

# **Comportement des éléments en béton à ultra hautes performances**

**Etude préliminaire avec le BUHP « M2C » de Holcim**

**Rapport d'essais**

**Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
Institut de structures – Construction en béton**

**Sylvain Plumey**

**Jörg Jungwirth**

**Aurelio Muttoni**

**Mandat 00.02, Rapport 00.02.R1, 2002**

# TABLE DES MATIERES

RESUME.....	2
COMPORTEMENT EXPERIMENTAL DU M2C.....	5
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	5
2. MATERIAU.....	6
3. PROCEDURES EXPERIMENTALES.....	7
Préparation des éprouvettes .....	7
Mesures et traitement des données .....	8
Essais de compression .....	8
Essais de traction directe (sans et avec fibres de verre) .....	9
Essais de traction sur tirant armé .....	11
Essais de flexion 4-points .....	11
4. RESULTATS ET DISCUSSION.....	13
Essais de compression .....	13
Essais de traction pure .....	16
Essais de traction sur éprouvettes armées de treillis de fibres de verre .....	19
Essais de traction sur tirant armé .....	20
Essais de flexion .....	22
5. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ESSAIS ET AVEC D'AUTRES MATERIAUX ..	25
Résultats M2C de Holcim.....	25
Résultats BPR200 .....	25
6. CONCLUSIONS.....	27
ANNEXES .....	29
A1. PREPARATION DES ESSAIS.....	30
A1.1 Planning .....	30
A1.2 Plan des moules.....	31
A1.3 Plan de dispositif de l'essai de traction .....	32
A1.4 Disposition des capteurs.....	33
A2. RESULTATS .....	34
A2.1 Compression – résistance .....	34
A2.2 Compression – module.....	40
A2.3 Traction pure .....	41
A2.4 Traction pure avec treillis de fibres de verre .....	44
A2.5 Traction sur tirant armé .....	47
A2.6 Flexion 4-points .....	50

## RESUME

### ESSAIS REALISES

Les essais effectués portent sur deux séries d'éprouvettes de même formulation du M2C (D42T, cf. tab.R1) mais ayant subi une cure différente (cure à 20° et à 90°C). La recette contient une forte quantité de fibres métalliques (1.5% en volume) d'une longueur importante ( $l = 25$  mm).

La campagne d'essais comporte :

- Essai de compression sur cylindre,
- Essai de traction directe,
- Essai de traction sur tirant armé,
- Essai de traction sur éprouvettes armées de treillis de fibres de verre,
- Essai de flexion 4 points sur prisme.

CEM III/A 52.5	638 kg
Laitier broyé	231 kg
Fumée de silice	239 kg
Sable de laitier tamisé ( $\phi=100-600\ \mu\text{m}$ )	1085 kg
Superplastifiant	23.7 kg
Fibres métalliques ( $l=25$ mm, $\phi=160\ \mu\text{m}$ )	116 kg
Eau	173 litres

*Tab.R1 : composition du M2C (formule D42T), pour 1 m<sup>3</sup>*

Les objectifs principaux de la campagne d'essais sont d'observer le matériau sous des sollicitations mécaniques dans les structures du génie civil, d'évaluer l'influence d'un traitement thermique sur le comportement et d'étudier le comportement du matériau lorsqu'il est armé de différents types d'armature.

### PRINCIPAUX RESULTATS

A la compression, le comportement est constitué d'une partie linéaire suivie d'une très petite phase non linéaire jusqu'à la rupture caractérisée par une chute brutale de la contrainte. La contrainte se stabilise ensuite à une valeur résiduelle.

Le traitement thermique a une influence considérable sur la résistance à la compression du matériau puisque celle-ci passe de 120 MPa à 180 MPa grâce à la cure à 90°C.

Le module d'élasticité mesuré est très faible (22 – 25 GPa) et n'est quant à lui pas influencé par le traitement thermique. Cette valeur, faible comparée à la résistance à la compression du matériau, est imputée partiellement à la présence de laitier en forte quantité dans la recette du matériau.

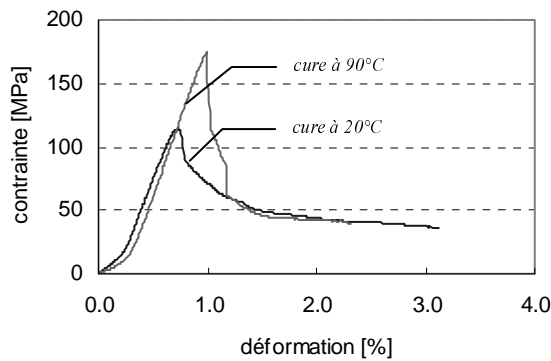


Fig.R1 : comportement à la compression :cure à 20°C et 90°C

A la traction, le matériau présente d’abord une phase élastique linéaire correspondant à l’état homogène non fissuré. Cette phase est suivie d’un comportement durcissant jusqu’à la contrainte de pic (10 MPa). Durant cette phase, une multitude de microfissures réparties le long de l’éprouvette se forment grâce à la présence des fibres métalliques. La dernière phase correspond à la concentration des déformations au droit d’une section au sein de laquelle une macrofissure se crée. Le comportement est alors adoucissant et la contrainte diminue alors que l’ouverture de la fissure augmente progressivement. Le comportement du matériau armé de fibres métalliques se distingue par sa capacité de déformation importante.

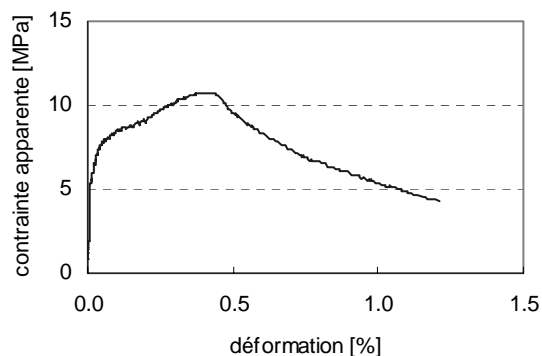
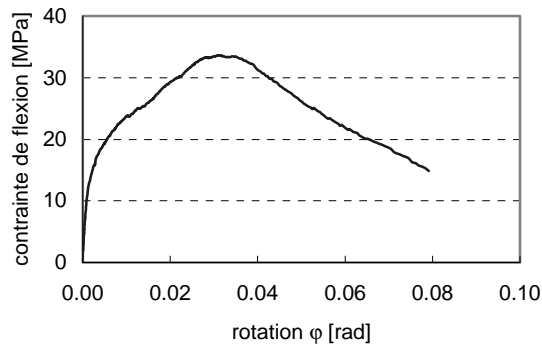


Fig.R2 : comportement à la traction (3TP90, cure à 90°C)

La propagation d’une fissure se fait selon un faciès complexe et non perpendiculairement à l’effort de traction comme c’est le cas pour un béton non armé de fibres. La fissure se propage selon le chemin des points faibles ce qui explique son parcours tortueux.

Le comportement pseudo-ductile en traction a d’importantes répercussions sur le comportement en flexion, qui est lui aussi constitué de trois phases distinctes profitant ainsi de l’effet des fibres métalliques.

Le stade homogène est suivi d’un comportement durcissant dû aux phases post-fissuration observées lors de l’essai à la traction jusqu’à un pic très élevé ( $\sigma_f = M/W = 30$  MPa). La résistance apparente à la flexion ( $\sigma_f$ ) est nettement supérieure à la résistance à la traction directe (2 à 3 fois plus grande). Cet effet dépend fortement des dimensions de l’élément (effet d’échelle) si bien que la résistance à la flexion n’est pas une propriété intrinsèque du matériau. Une fois le moment maximal atteint, celui-ci diminue progressivement (comportement adoucissant).



*Fig.R3 : comportement à la flexion (4flex90, cure à 90°)*

Le traitement thermique a une influence variable sur les propriétés du matériau. Celui-ci permet d'augmenter fortement la résistance à la compression mais n'a que peu d'influence sur la résistance à la traction ou sur le module d'élasticité.

Le tableau R2 résume les principales caractéristiques mesurées durant la campagne d'essais :

Propriété	Cure à 20°C	Cure à 90°C
Résistance à la compression [MPa]	120	180
Module d'élasticité [MPa]	25000-35000	25000-35000
Résistance à la traction [MPa]	5-10	5-10
Résistance à la flexion [MPa]	25	30-35

*Tab.R2 : valeurs caractéristiques mesurées*

La présence de fibres métalliques en forte quantité confère au matériau cimentaire des propriétés intéressantes en vue de son utilisation dans le domaine de la construction. Les fibres se substituent au béton lors de la fissuration permettant ainsi d'augmenter la capacité portante du matériau, de conférer une ductilité au comportement en créant une multifissuration de l'élément. Cet effet de couture des fissures permet de contrôler l'ouverture des fissures de manière efficace et d'éviter ainsi des fissures d'ouverture importante néfaste sur la durée de vie de l'élément.

Néanmoins, la recette n'est pas encore satisfaisante en vue d'une utilisation industrielle puisque l'ouvrabilité du mélange frais est très mauvaise (pâte plastique).

Le M2C reste malgré tout un matériau de construction très prometteur grâce à ses très bonnes propriétés mécaniques et à sa résistance élevée aux agressions chimiques et physiques.

# COMPORTEMENT EXPERIMENTAL DU M2C

## 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le M2C est un béton à ultra hautes performances en cours de développement chez le cimentier Holcim International.

Il se distingue principalement des BUHP actuellement sur le marché par la nature des composants utilisés, qui sont en majorité des sous-produits industriels valorisés (laitier), et par la géométrie et la quantité des fibres métalliques qu'il contient.

La recette employée (formule D42T) est issue de l'optimisation du dosage des différents composants cimentaires et des fibres métalliques utilisés de manière à obtenir le matériau le plus dense possible à l'état durci. La résistance à la compression étant directement liée à la densité du matériau, la démarche suivie permet d'obtenir un matériau de résistance à la compression très élevée.

Une étape supplémentaire à l'industrialisation d'un nouveau matériau est l'étude des différentes utilisations où il pourrait potentiellement concurrencer les produits déjà disponibles. L'utilisation du M2C en tant que matériau de construction nécessite par conséquent l'étude de son comportement sous diverses sollicitations afin de comprendre quels avantages son application peut apporter aux structures du génie civil.

Les essais effectués ici représentent un premier pas dans ce long processus de développement. Ils cherchent à comprendre l'influence de certains paramètres sur le comportement mécanique du matériau en vue d'une utilisation dans divers éléments structuraux. Les objectifs principaux de la campagne d'essais sont, notamment :

- observer le comportement du matériau sous les sollicitations dans les structures,
- évaluer l'influence d'un traitement thermique sur la réponse du matériau à ces sollicitations,
- décrire le comportement à la traction du matériau armé de diverses armatures (fibres métalliques, treillis de fibres de verres et barre d'armature traditionnelle).

L'influence du traitement thermique est estimée en effectuant les essais avec 2 séries d'éprouvettes de formulation identique mais ayant subi une cure différente (cure à 20°C et à 90°C).

Essai	Cure à 20°C	Cure à 90°C
Compression	6	6
Traction pure	3	3
Traction sur tirant armé	3	3
Traction avec fibres de verre	3	3
Flexion	2	4

Tab.1 : éprouvettes testées

La campagne d'essais comporte les essais suivants :

- Essai de compression sur cylindre
- Essai de traction directe
- Essai de traction sur tirant armé
- Essai de traction sur éprouvettes armées de treillis de fibres de verre
- Essai de flexion 4 points sur prisme

## 2. MATERIAU

La composition de la recette D42T choisie pour cette série d'essais est la suivante (pour une gâchée de  $1 \text{ m}^3$ ) :

CEM III/A 52.5	638 kg
Laitier broyé	231 kg
Fumée de silice	239 kg
Sable de laitier tamisé ( $\phi=100\text{-}600 \mu\text{m}$ )	1085 kg
Superplastifiant	23.7 kg
Fibres métalliques ( $l=25 \text{ mm}$ , $\phi=160 \mu\text{m}$ )	116 kg
Eau	173 litres

Tab.2 : composition du M2C (formule D42T)

La matrice cimentaire présente les caractéristiques suivantes :

- masse volumique du mélange frais :  $\rho = 2506 \text{ kg/m}^3$
- rapport Eau / Liant :  $E/L = 0.20$  (coefficient d'équivalence de la fumée de silice = 1)
- sous-produit de l'industrie : 57 % du mélange à sec (laitier)

Le matériau est un composite composé de la matrice cimentaire et de fibres métalliques dont les caractéristiques sont (voir tab.2) :

- fibres rectilignes (pas de crochets) sans traitement de surface
- longueur : 25 mm
- diamètre : 160  $\mu\text{m}$

Pour une série d'essais en traction, des fibres de verre sont utilisées comme armature additionnelle. Cette armature se présente sous la forme de plusieurs nappes de treillis superposées. Chaque nappe de treillis est constituée de 10 rovings longitudinaux de type AR-Glas 2500 TEX d'une section de  $0.923 \text{ mm}^2$ .

### 3. PROCEDURES EXPERIMENTALES

#### Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été préparées le 5 décembre 2001 à Obourg en Belgique (Ciments Obourg) puis acheminées vers Lausanne pour être testées au laboratoire de l'Institut de Structures à l'EPFL.

Les éprouvettes ont été préparées en deux gâchées de respectivement 60 et 72 litres selon la procédure suivante :

- malaxage du mélange à sec avec un malaxeur ordinaire durant 2 minutes en introduisant les composants du plus fin au plus grossier,
- introduction de l'eau et de 50% de l'adjuvant suivie d'un malaxage de 3 minutes,
- introduction de l'adjuvant restant,
- malaxage jusqu'à ce que le mélange acquiert la consistance désirée (2 minutes),
- introduction des fibres métalliques de manière progressive tout en poursuivant le malaxage (15 minutes).

La mise en place dans les moules du mélange frais à caractère visqueux nécessite une vibration au moyen d'une table vibrante.



*Fig.1 : préparation des éprouvettes*

Les éprouvettes de la deuxième gâchée ont subi le traitement spécial suivant :

- 24 heures en chambre humide,
- 48 heures à 90°C,

tandis que les éprouvettes de la première gâchée ont subi une cure standard à 20°C.

Pour des raisons organisationnelles, les essais sont étalés sur une semaine à partir du 35ème jour après le coulage des éprouvettes (et non à 28 jours).



## Mesures et traitement des données

Les essais effectués sont menés en utilisant le dispositif de commande et de traitement des mesures représenté sur le schéma suivant :

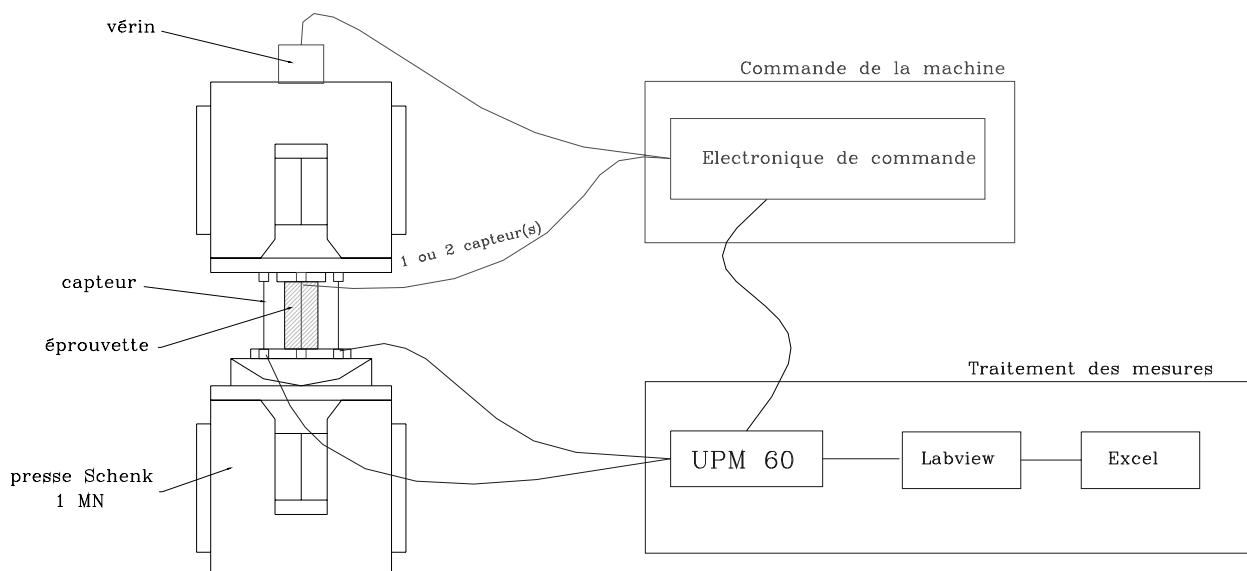


Fig.2 : système d'instrumentation

Les capteurs utilisés pour les mesures des déformations et pour la commande de la machine sont des capteurs inductifs de déplacement de type W5K de la maison HBM (mesure de  $\pm 5$  mm).

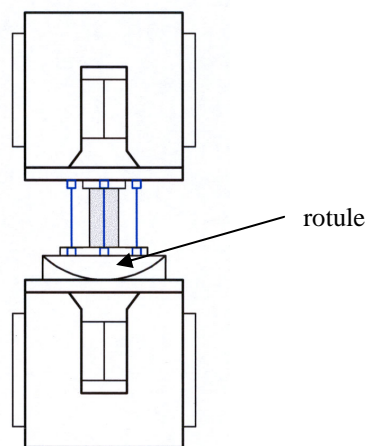
## Essais de compression

Les essais de compression simple sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques d'un diamètre de 70 mm et d'une hauteur de 140 mm. Les surfaces d'extrémité sont rectifiées auparavant pour assurer une application uniforme de la force sur toute la surface de l'éprouvette. L'effort est appliqué par deux plateaux métalliques liés à la presse à deux plaques métalliques placées de part et d'autre de l'éprouvette.

Les éprouvettes testées avec ce dispositif (série R) ont présenté une grande dispersion dans les mesures, probablement due au non parallélisme des surfaces d'extrémités, si bien qu'une rotule a été ajoutée au système (fig.3).

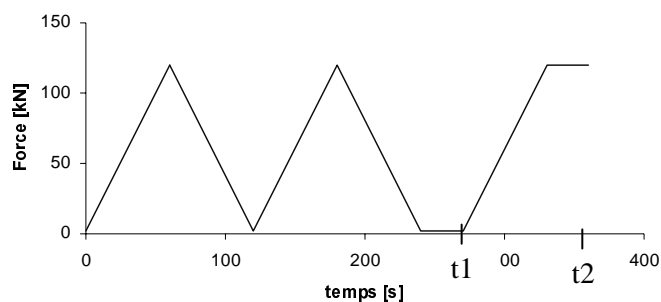
Le dispositif est instrumenté de trois capteurs inductifs de déplacement mesurant le déplacement relatif entre le plateau supérieur et la plaque inférieure. Un capteur est utilisé pour guider la machine tandis que les deux autres mesurent les déformations longitudinales de l'éprouvette.

Les essais sont contrôlés en déplacement à une vitesse de 0.35 mm/min pour mesurer d'une part la charge de rupture et pour obtenir la courbe force – déplacement d'autre part.



*Fig.3 : dispositif pour l'essai de compression*

Six éprouvettes (Série E) sont d'abord soumises à des cycles de chargement et de déchargement dans leur phase élastique afin de mesurer le module d'élasticité du matériau. Durant cette phase de l'essai, le chargement est alors contrôlé en force à une vitesse de 2 kN/s selon un schéma triangulaire.



*Fig.4 : chargement pour la mesure du module d'élasticité (cure à 20°C)*

La force de pic dépend de la résistance à la compression prévue et vaut respectivement 120 kN et 160 kN pour les éprouvettes ayant subi une cure à 20°C et à 90°C.

Le module est alors mesuré sur la dernière rampe de chargement (= module sécant) entre les temps t1 et t2.

Les essais de compression comportent 12 éprouvettes et sont réalisés avec une presse de la maison Schenk d'une capacité de 1000 kN.

## Essais de traction directe (sans et avec fibres de verre)

Afin d'étudier le comportement à la traction du M2C, des éprouvettes de forme spéciale ont été élaborées (fig.5). La section de l'éprouvette diminue progressivement de son extrémité vers la partie centrale. Le côté de l'éprouvette est composé de deux droites raccordées par un segment parabolique. La longueur totale de l'éprouvette est de 600 mm alors que la partie centrale de section 50 mm x 100 mm a une longueur de 200 mm.

L'effort est introduit par un dispositif tenu par les mors de la machine qui permet d'accrocher l'éprouvette. Ce dispositif contient une rotule afin d'éviter l'introduction d'un effort de flexion indésirable. Des feuilles de plomb sont placées entre l'éprouvette et le dispositif de prise de manière à répartir uniformément l'effort dans l'éprouvette.

Six des douze éprouvettes (6 cure à 20°C / 6 cure à 90°C) sont armées, en plus des fibres métalliques, de 2 x 9 nappes (10 rovings par nappe) de treillis de fibres de verre d'une capacité portante totale théorique de 90 kN (fig.5). Les nappes de treillis sont coulées dans le béton. Les six autres éprouvettes sont armées uniquement de fibres métalliques.



EPFL-IS-BETON page 10/55

## Essais de traction sur tirant armé

L'essai est effectué sur un tirant prismatique de dimensions de 100 x 100 x 600 mm ( $b \times h \times l$ ) armé d'une barre d'armature (S500) d'un diamètre de 22 mm ( $\rho = A_s/A_c = 3.8\%$ ).

L'effort est introduit en tirant directement sur la barre avec les mors de la machine. L'éprouvette est instrumentée de deux capteurs inductifs de déplacement mesurant l'allongement du tirant armé qui fournissent la courbe force-déplacement. Les plaques de la machine sont équipées de deux capteurs utilisés pour conduire la machine.

Les essais comportent 6 éprouvettes (3 cure 20°C / 3 cure 90°C) et sont réalisés avec une presse de la maison Schenk d'une capacité de 1000 kN. Ils sont contrôlés en déplacement à une vitesse de 0.2 mm/min.

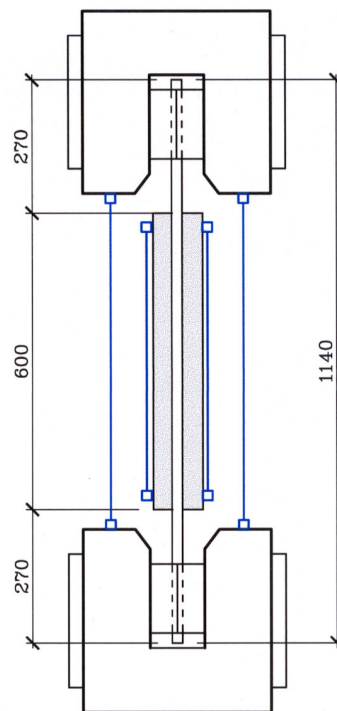


Fig.6 : dispositif pour l'essai de traction sur tirant armé

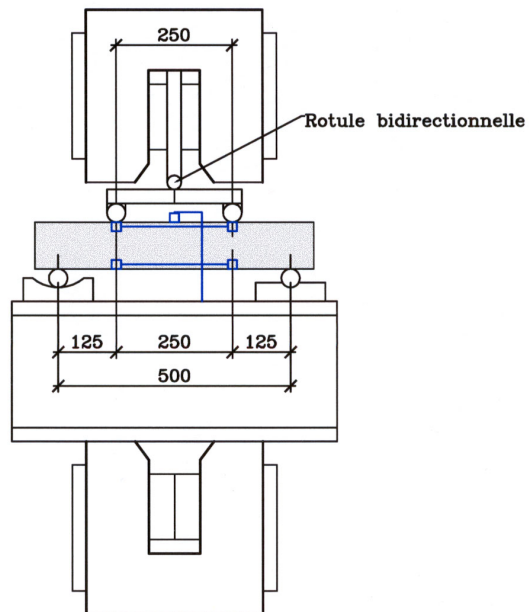
## Essais de flexion 4-points

Le comportement du M2C à la flexion est étudié sur une poutrelle prismatique de dimensions de 100 x 100 x 600 mm ( $b \times h \times l$ ), chargée en flexion 4-points. La poutre repose sur un appui fixe et un appui mobile distants de 500 mm l'un de l'autre.

La force est appliquée en deux points distants de 250 mm sollicitant ainsi la poutrelle à une flexion constante sur cette distance.

La flèche est relevée par deux capteurs inductifs de déplacement qui mesurent le déplacement vertical de la fibre supérieure de la poutre fournissant ainsi la courbe flèche-force. Deux autres capteurs mesurent respectivement l'allongement de la fibre inférieure et le raccourcissement de la fibre supérieure entre les points d'application de la charge. Un cinquième capteur permet de guider le chargement de la machine.

Les essais de flexion 4-points comportent 6 éprouvettes (2 cure 20°C / 4 cure 90°C) et sont réalisés à l'aide d'une presse de la maison Schenk d'une capacité de 1000 kN. Ils sont contrôlés en déplacement à une vitesse de 0.2 mm/min. La vitesse de chargement est augmentée lorsque l'éprouvette a atteint sa charge maximale.



*Fig.7 : dispositif pour l'essai de flexion*

## 4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats complets comprenant les différentes courbes mesurées durant les séances d'essais sont présentées en annexe.

### Essais de compression

Les graphiques suivants présentent les résultats obtenus durant les différents essais de compression effectués. Les éprouvettes dénommées par la lettre R et E correspondent respectivement aux deux séries testées (sans et avec rotule dans le dispositif).

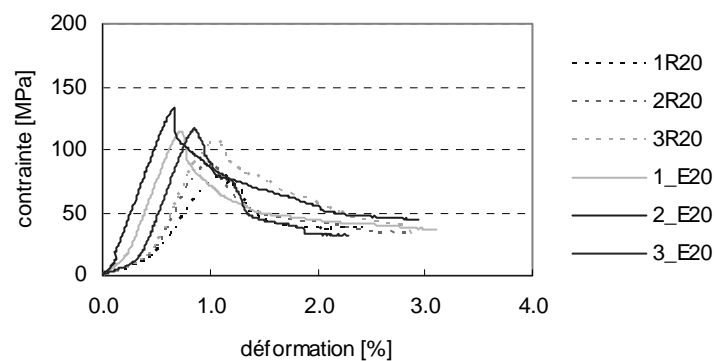


Fig.8 : essai de compression, cure à 20°C (séries R et E)

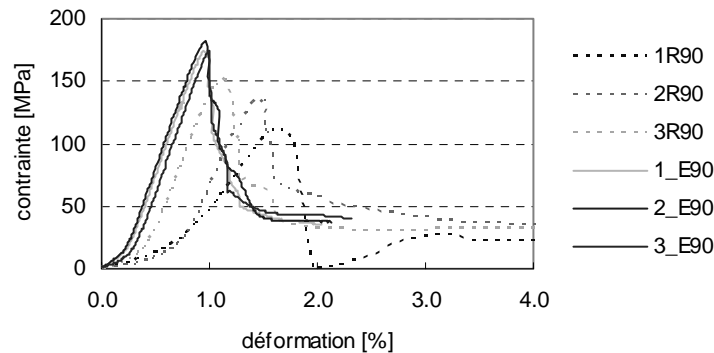


Fig.9 : essai de compression, cure à 90°C (séries R et E)

La courbe contrainte – déformation est obtenue à partir des mesures de la force  $F$  et du déplacement relatif moyen dans les capteurs  $\Delta l$ , selon les relations :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{3850 \text{ mm}^2} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\Delta l}{140 \text{ mm}}$$

La déformation représentée dans les figures 8, 9 et 10 correspond ainsi à la déformation moyenne de l'éprouvette. Elle contient donc la déformation d'une plaque métallique et la

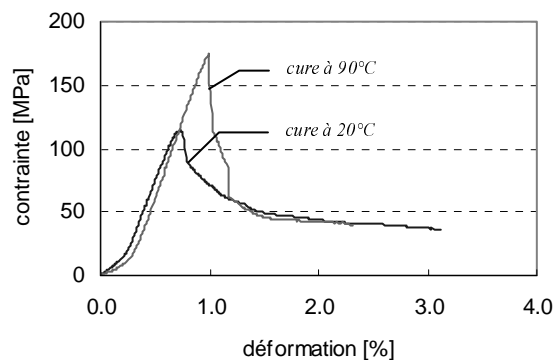
déformation des extrémités de l'éprouvette soumises à un état de contrainte perturbé par l'introduction de la force et par le frottement de l'éprouvette sur la plaque métallique. Cette déformation n'est donc pas exactement représentative de l'état de contrainte uniforme de la zone centrale de l'éprouvette.

Les éprouvettes 1-2-3-R20 et 1-2-3-R90 (Série R) montrent des comportements très différents et très dispersés tant au niveau de la résistance que de la déformation à la rupture. Cette dispersion s'explique par la mauvaise rectification des éprouvettes et par l'absence de rotule dans le dispositif premièrement utilisé. Ces deux problèmes ont pour conséquence de créer un mauvais contact entre les extrémités des éprouvettes et les plaques métalliques si bien que le chargement de l'éprouvette n'est pas uniforme sur la surface de contact et que l'effort est excentré par rapport à l'axe de l'éprouvette (flexion). Ces phénomènes expliquent la rupture précoce des éprouvettes observée sur cette série (éclatement des bords de l'éprouvette).

Ces problèmes sont résolus partiellement par l'introduction d'une rotule dans le dispositif et par une deuxième rectification des éprouvettes (Série E).

Les éprouvettes 1-2-3-E20 et 1-2-3-E90, testées avec ce nouveau dispositif, montrent des résistances plus élevées et un comportement beaucoup moins dispersé.

Compte tenu des problèmes rencontrés avec la série R, la discussion des résultats se base sur la deuxième série d'essais (série E). Le graphique suivant présente le comportement de deux éprouvettes représentatives ayant subi respectivement une cure à 20°C et à 90°C (1E20 et 1E90).



*Fig.10 : comportement à la compression : cure à 20°C et à cure 90°C*

Le comportement est constitué d'une partie linéaire élastique suivie d'une très petite phase non linéaire jusqu'à la rupture caractérisée par une chute brutale de la contrainte. La contrainte se stabilise ensuite à une valeur résiduelle (30-40 MPa) et le comportement est adoucissant.

On constate que la phase linéaire élastique est précédée sous faible niveau de sollicitations d'une phase de transition durant laquelle le module augmente progressivement. Ce comportement est expliqué d'une part par la flexibilité du système et par sa mise en place lors du chargement, et d'autre part par le contact imparfait entre la surface de l'éprouvette et la plaque métallique. En effet, des irrégularités de surface (non planéité, non parallélisme,...) peuvent être la cause de ce comportement particulier.

Les éprouvettes présentent des faciès de rupture compliqués à cause de la présence de fibres métalliques. La plupart des éprouvettes se sont fissurées selon un plan de rupture en diagonale (voir figure ci-dessous) mais de nombreuses fissures et des éclatements du béton de peau compliquent l'analyse du mode de rupture.



*Fig.11 : faciès de rupture*

Les valeurs mesurées sur la série d'éprouvettes E sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Eprouvettes	Résistance à la compression, $f_{cr}$ [MPa]	Déformation au pic [%]	Module de Young, E [MPa]
1E20	114.2	0.73	21000
2E20	132.7	0.66	23800
3E20	116.8	0.85	21600
Moyenne	121.2	0.75	22100
1E90	174.9	0.95	24000
2E90	182.3	0.97	24400
3E90	174.6	1.00	25000
Moyenne	177.3	0.97	24500

*Tab.3 : valeurs du comportement à la compression*

La présence d'une zone de perturbation au début du chargement rend difficile l'interprétation des mesures obtenues lors du chargement triangulaire pour la mesure du module d'élasticité.

Le module est alors calculé lors de l'essai destructif sur la courbe générale contraintes – déformations entre les contraintes de 50 et 100 MPa pour les éprouvettes ayant subi une cure spéciale et entre 30 et 60 MPa pour les autres éprouvettes. Ces plages se situent dans la phase linéaire élastique du matériau suivant la zone de perturbation initiale.

On constate que le module de Young est très faible et est même inférieur à celui des bétons traditionnels. Ceci s'explique en partie par le système d'instrumentation qui ne permet pas de connaître la déformation de la zone centrale de l'éprouvette, supposée non perturbée (contraintes uniformément réparties). La mesure contient les perturbations présentes au droit des interfaces et la flexibilité d'une partie du système de mise en charge (plaque métallique).

Une autre raison pouvant expliquer la valeur très faible du module est la présence d'une quantité élevée de laitier dans la composition du matériau comme liant et comme sable. Son utilisation dans un béton est unique et il serait nécessaire de connaître ses propriétés mécaniques, notamment sa déformabilité pour pouvoir mesurer son effet sur les caractéristiques du matériau. En effet, le module du béton est fonction des modules du



squelette granulaire et de la matrice cimentaire. Si le module des granulats de laitier est faible, le module du béton le sera également.

Il est intéressant de constater que le traitement thermique a une influence considérable sur la résistance à la compression du matériau ; celle-ci passe de 120 MPa à 180 MPa lorsqu'un traitement thermique est appliqué.

On constate que le module d'élasticité n'est pas amélioré par le traitement thermique. Le module de Young dépend des constituants qui forment le matériau. Le traitement thermique ne modifie pas les caractéristiques des composants mais améliore les liaisons entre ces différents composants. Il n'a donc pas d'effet notable sur cette caractéristique du matériau.

Le comportement post-pic est plus fragile (chute plus brutale) pour les éprouvettes traitées à 90°C. Par contre, on observe un comportement résiduel identique. Les fibres métalliques gouvernent le comportement à ce stade de l'essai et l'effet du traitement thermique est secondaire.

## Essais de traction pure

L'état de traction pure est très difficile à réaliser en laboratoire pour plusieurs raisons :

- Il est très difficile d'assurer une introduction parfaitement centrée de l'effort dans l'éprouvette. La présence d'une rotule et de feuilles de plomb ainsi qu'une disposition précise de l'éprouvette dans les mâchoires de serrage permettent de s'approcher de l'état recherché.

- La géométrie de l'éprouvette n'est jamais parfaitement symétrique (imprécisions du coffrage, rectitude,...).
- L'hétérogénéité du matériau lui-même résultant de la mise en place (éprouvettes bétonnées horizontalement) entre les couches inférieure et supérieure du béton.
- Une hétérogénéité supplémentaire peut dériver de la présence de fibres métalliques dans le mélange. En effet, la répartition des fibres n'est pas parfaitement homogène et isotrope. La présence du coffrage représente des plans d'orientation préférentiels des fibres et la vibration peut renforcer ce problème.

En conséquence de ces différents effets, les sollicitations et les déformations ne sont pas symétriques.

Il a été constaté durant les essais effectués que même lorsque l'éprouvette est apparemment centrée (c'est à dire que les mesures montrent avant fissuration un comportement symétrique des deux capteurs), l'hétérogénéité du matériau se manifeste lors de la fissuration et provoque l'apparition d'une fissure sur un côté de l'éprouvette. Cette fissure ne se propage pas sur toute la surface instantanément ce qui provoque une rotation due à la déformation asymétrique de l'éprouvette. Heureusement, ce phénomène a tendance à disparaître lorsque l'effort devient plus important, que la fissure se propage et que toute la section est finalement fissurée.

Compte tenu des difficultés énoncées ci-dessus, les essais réalisés présentent une grande dispersion dans les comportements observés. Des problèmes rencontrés avec la machine ont encore compliqué la réalisation des essais ; seules 3 des 6 éprouvettes testées ont pu être observées et mesurées convenablement.

Par contre, la forme de l'éprouvette a parfaitement joué son rôle puisque toutes les éprouvettes se sont cassées dans la zone centrale instrumentée.

Le comportement du M2C en traction est constitué de 3 phases (cf fig.12). Tout d'abord le comportement est linéaire élastique ; cette phase correspond au stade homogène non fissuré du matériau. Elle est suivie d'une phase de microfissuration où le comportement est

durcissant. Durant cette phase, un certain nombre de microfissures (multifissuration) se créent mais la contrainte continue à augmenter jusqu'à la contrainte de pic. Les fibres métalliques sont mobilisées grâce à la bonne adhérence entre celles-ci et la pâte et permettent de reprendre l'effort sans perte de capacité portante. La dernière phase correspond à la création d'une macrofissure qui s'ouvre progressivement. Le comportement est alors adoucissant et la contrainte diminue progressivement. La rupture de l'éprouvette se fait par arrachement des fibres métalliques sous une ouverture de fissure très importante (~10mm).

Les essais ont montré deux comportements différents correspondant à deux modes de rupture :

1. Fissuration concentrée en une seule zone
2. Multifissuration sur toute la longueur de l'éprouvette

Dans le premier mode, la phase durcissante est presque inexistante. La fissuration se concentre dans une zone réduite de l'éprouvette et une macrofissure s'ouvre très rapidement sans que la contrainte apparente n'ait pu augmenter sensiblement. Le pic de contrainte se situe alors entre 5 et 6 MPa.

Ce comportement est sans doute dû à une sollicitation en flexion présente dans le système qui provoque la rupture précoce de l'éprouvette.

Le deuxième mode de rupture correspond à ce qui était attendu. Le stade durcissant est très important et il permet de doubler la résistance à la traction du matériau (10.6 MPa). L'éprouvette se multifissure durant cette phase. Les fibres métalliques sont en quantité suffisante pour se substituer au béton lorsqu'une microfissure apparaît. Une redistribution des contraintes est alors possible.

Ce mode de rupture n'a malheureusement pu être observé que lors d'un seul essai (3TP90) et il est par conséquent difficile d'assurer que ce comportement soit représentatif du matériau.

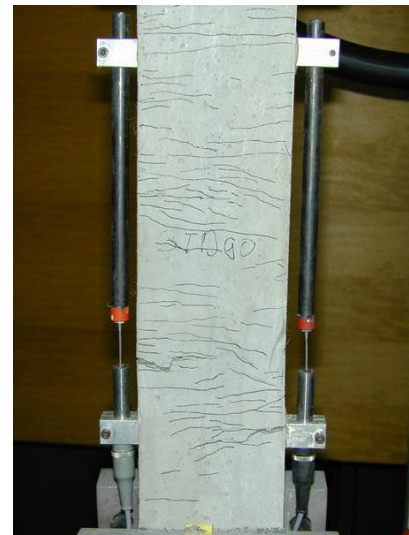
Eprouvette	Contrainte de pic [MPa]	Mode de rupture	Remarques
1TP20	6.0	1	Arrêt machine
2TP 20	6.8	1	Vitesse trop importante
3TP20	5.7	1	
1TP90	5.6	1	
2TP90	4.4	1	Rotation de l'éprouvette
3TP90	10.7	2	

*Tab.4: résumé des observations*

Il est intéressant de constater que les faciès de rupture sont très complexes. La fissure n'est pas située dans un plan perpendiculaire à l'effort comme dans le cas du béton non armé ordinaire. La fissure est tortueuse et cherche le chemin le plus faible pour se propager.



a)



b)

Fig.12 : a) rupture sans multifissuration de l'éprouvette (1TP20)

b) rupture avec multifissuration de l'éprouvette (3TP90)

La figure 13 présente les deux comportements observés :

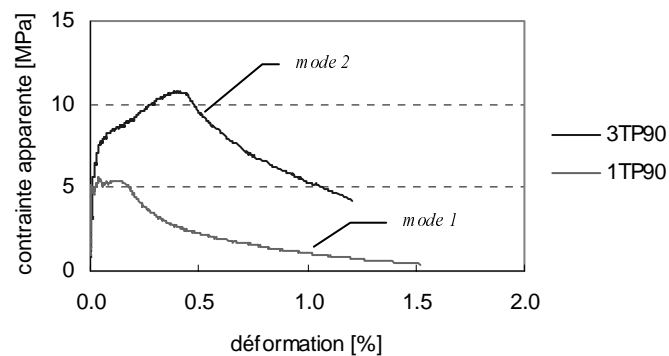


Fig.13 : comportements à la traction observés : modes de rupture 1 et 2.

La contrainte apparente est égale au rapport de la force sur l'aire de la section dans la zone centrale de l'éprouvette :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{5000 \text{ mm}^2} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\Delta l}{580 \text{ mm}}$$

La déformation moyenne représentée dans la figure n'a de sens que dans les deux premières phases du comportement où celle-ci est répartie plus ou moins uniformément sur toute la longueur de l'éprouvette. Dès l'ouverture de la macrofissure, les déformations se concentrent autour d'une section et il serait plus judicieux de représenter la contrainte et l'ouverture de la fissure. Cette dernière n'ayant pas été mesurée, la déformation donne néanmoins un ordre de grandeur de la ductilité du phénomène.

On constate que la déformation au pic de contrainte est de 0.4 % ce qui représente une déformation de rupture très importante.

Il est difficile de déterminer précisément le module d'élasticité sur la base des résultats d'un essai de traction. Une estimation effectuée sur l'éprouvette 3TP90 dans sa phase élastique linéaire montre que le module se situe entre 35000 et 40000 MPa, ce qui est nettement supérieur au module déterminé sur la base de l'essai de compression.

L'influence du traitement thermique n'a pas pu être estimée sur les essais effectués par manque d'essais concluants. Le renforcement de la microstructure par un traitement spécial permet certainement d'augmenter la résistance à la fissuration du matériau. L'influence sur la résistance ultime du composite est certainement réduite puisque ce sont les fibres qui contrôlent en grande partie le comportement du matériau après la fissuration et donc la contrainte de pic.

### Essais de traction sur éprouvettes armées de treillis de fibres de verre

En plus de la même quantité de fibres métalliques que dans la série d'essais précédente (§4.2), les éprouvettes de cette série sont armées de treillis de fibres de verres coulées dans le béton (cf. fig.5, §3.3).

Contrairement aux essais de traction sans treillis de fibres de verre, le comportement est moins sensible aux différentes difficultés rencontrées précédemment. En effet, la présence de treillis a tendance à rendre symétrique l'éprouvette ; l'importance des différentes sources d'hétérogénéité est réduite car c'est les fibres de verre qui contribuent principalement à la reprise de l'effort.

La figure 14 compare le comportement de l'éprouvette armée de fibres de verre avec les comportements observés avec les autres éprouvettes.

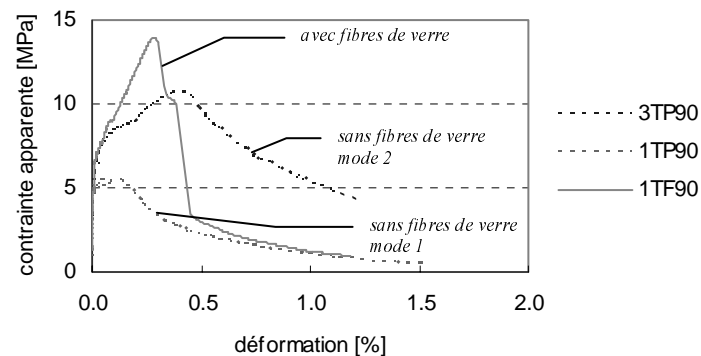
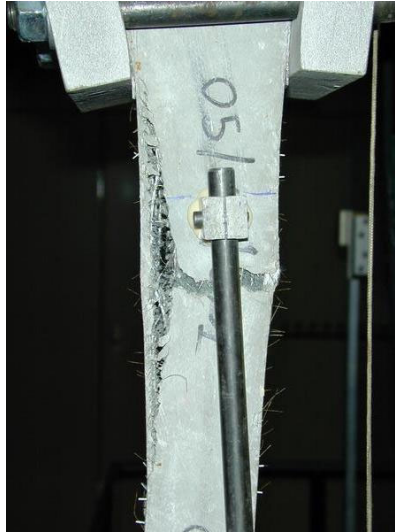


Fig.14 : essais de traction : influence des fibres de verre

Le comportement est constitué traditionnellement de trois phases. La première, linéaire élastique, correspond au stade où le béton n'est pas fissuré. La fissuration du béton s'accompagne d'une perte de rigidité et l'effort est repris principalement par les treillis de fibres de verre. Cette phase est également linéaire jusqu'à la rupture. A la rupture, le comportement fragile des fibres de verre se traduit par une chute importante et brusque de la contrainte apparente. La contrainte se stabilise ensuite à une valeur faible et le comportement est ensuite adoucissant. Il correspond à la phase adoucissante observée durant les essais de traction pure du mode de rupture 1.

L'éprouvette rompt par arrachement des fibres de verre à la naissance de la zone transitoire parabolique de l'éprouvette (cf. fig.15). Cette zone est défavorable car la courbure

engendre des forces de déviation de traction qui ont tendance à décoller les treillis de fibres de verre. Ceci se traduit par la délamination des treillis à une charge équivalente à 90 % de la charge de rupture. Ce phénomène est accentué par le fait que les fibres métalliques pénètrent mal dans les mailles du treillis, ce qui diminue la résistance à la traction perpendiculairement aux nappes de treillis.



*Fig.15 : rupture de l'éprouvette par délamination*

La qualité du béton offre une excellente adhérence aux treillis de fibres de verre coulés dans la pâte cimentaire. Cette adhérence permet de faire travailler le béton et les fibres de verre solidairement jusqu'à la délamination des treillis.

Les fibres constituent une entrave à la mise en place du béton entre les mailles des treillis. Une ségrégation des plus grosses particules ou une mauvaise pénétration du mélange cimentaire est possible ce qui peut avoir une influence négative sur le comportement de l'élément, notamment sur l'adhérence entre la matrice et les fibres de verre. L'utilisation combinée de treillis de fibres de verre et de fibres métalliques est par conséquent sujette à certaines interrogations.

A nouveau, les essais n'ont pas permis de mettre en évidence l'influence du traitement thermique sur le comportement des éprouvettes.

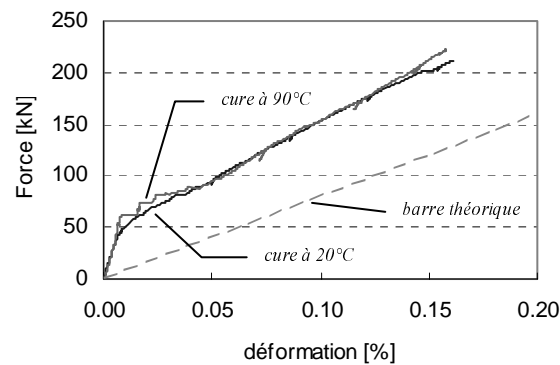
## **Essais de traction sur tirant armé**

Les essais n'ont pas permis d'observer le comportement complet jusqu'à la ruine du tirant armé d'une barre d'armature. En effet, bien que le tirant possède une armature relativement élevée ( $\rho = 3.8\%$ ), celle-ci n'a pas été suffisante pour empêcher l'écoulement de la barre au droit de sa prise dans les mors de la machine, avant la ruine de l'élément en béton lui-même. Ceci est dû à la résistance à la traction élevée du matériau béton.

Le comportement observé a permis de distinguer trois phases. La première correspond au comportement linéaire élastique lorsque le béton est non fissuré. Ensuite, de nombreuses fissures apparaissent dans le béton (multifissuration) se qui se traduit par une perte de rigidité du tirant. Cette phase de microfissuration est accompagnée d'un accroissement de l'effort dans le tirant.

Etant donné la taille de l'ouverture des fissures à ce stade du comportement, il est difficile de constater visuellement la fin de la phase de formation des fissures et le début de la phase de fissuration stabilisée durant laquelle les microfissures s'ouvrent. Cette troisième phase est par contre visible sur les courbes mesurées puisqu'on observe un changement de rigidité suivi d'une phase linéaire (cf. fig.16).

Il est intéressant de remarquer que la contribution du béton tendu (tension stiffening) est très importante et que la présence des fibres permet d'augmenter sensiblement la rigidité du tirant. De plus, l'ouverture des fibres reste très faible même pour des déformations du tirant importantes.



*Fig.16 : tirant armé : cure à 20°C à 90°C*

L'influence du traitement thermique sur le comportement est faible comme le montre la figure 16. La contribution du béton tendu à la rigidité du tirant est légèrement supérieure pour les éprouvettes ayant subi un traitement thermique. Les courbes se superposent après cette courte phase transitoire.

L'inspection visuelle de celles-ci montre que la fissuration est plus régulière (espacement des fissures) le long des éprouvettes traitée thermiquement.



*Fig.17 : multiffissuration de l'éprouvette (cure à 90°C)*

## Essais de flexion

L'essai de flexion constitue un essai moins difficile à réaliser et plus représentatif des situations réelles que ne l'est l'essai à la traction directe.

La contrainte nominale de flexion  $\sigma_f$  est obtenue en divisant le moment de flexion par le moment statique :

$$\sigma_f = \frac{M}{W} = \frac{M}{b \cdot h^2 / 6}$$

Les graphiques ci-dessous présentent les résultats des essais effectués :

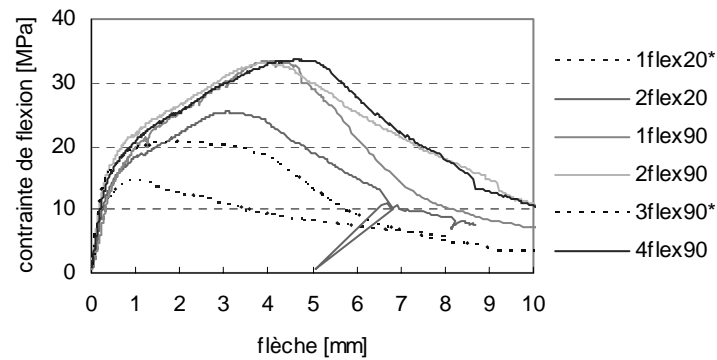


Fig.18 : relation entre la contrainte nominale de flexion et la flèche mesurée

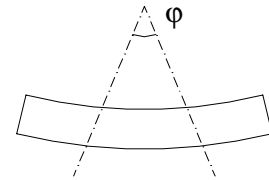
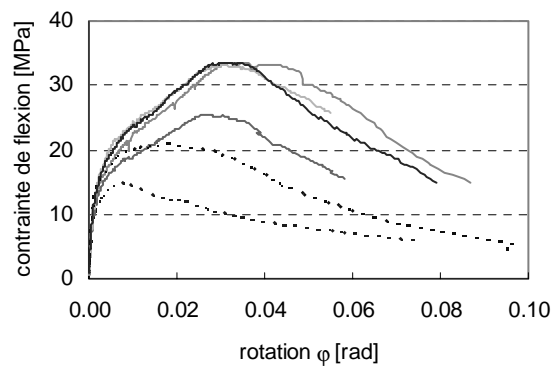


Fig.19 : relation entre la contrainte nominale de flexion et la rotation

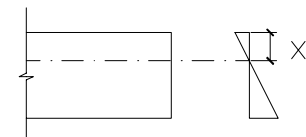
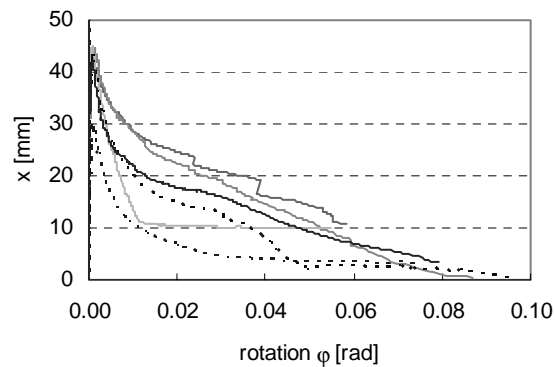


Fig.20 : position de l'axe neutre en fonction de la rotation mesurée

Le comportement est divisé en trois phases. La phase linéaire élastique correspondant à l'état non fissuré du matériau est suivie d'une phase durcissante durant laquelle le moment continue à augmenter jusqu'au moment maximal. Cette augmentation du moment est la conséquence de la combinaison de deux phénomènes.

D'une part, la poutre subit une multifissuration correspondant au comportement durcissant du matériau soumis à la traction. Cette phase se traduit par une augmentation des contraintes. D'autre part, l'ouverture d'une fissure ne signifie pas qu'aucune contrainte ne puisse être reprise à travers la fissure. En effet, le comportement adoucissant observé durant les essais de traction permet de trouver un équilibre pour reprendre des moments plus importants que le moment de fissuration ; cela grâce à l'effet des fibres métalliques. A l'intérieur de la section fissurée, l'augmentation du moment se traduit par une élévation de l'axe neutre. Cette perte de bras de levier est compensée par l'augmentation des résultantes des contraintes permettant ainsi d'atteindre des sollicitations plus élevées.

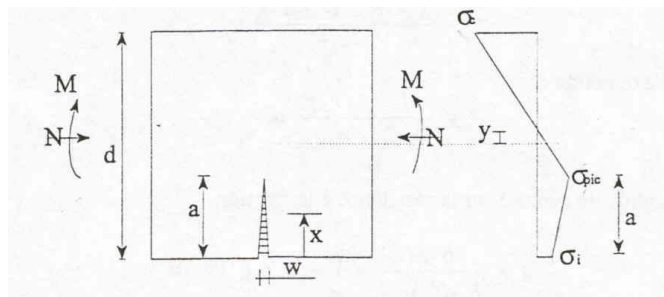


Fig.21 : répartition des contraintes au droit d'une fissure dans le stade durcissant du comportement en flexion (selon Belhouli)

Il faut remarquer qu'une macrofissure se développe progressivement en choisissant le chemin le plus faible (fissure tortueuse) et non selon un plan perpendiculaire à l'axe de la poutre.

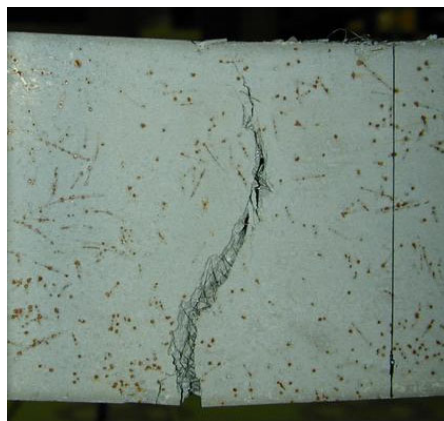


Fig.22 : fissure tortueuse, grâce à l'effet des fibres métalliques

Une fois la charge maximale atteinte, on observe une diminution progressive du moment lorsque la flèche augmente. Ce comportement adoucissant se poursuit jusqu'à l'éclatement du béton dans la zone comprimée dû à la forte courbure présente dans l'éprouvette.

Le tableau 5 résume les valeurs caractéristiques mesurées durant les essais.



\*Sur les 6 éprouvettes testées, 2 essais (1flex20 et 3flex90) ne se sont pas déroulés correctement à cause de problèmes avec la machine. Ces éprouvettes ont subi des cycles de chargement-déchargement qui les ont endommagées ; les résistances atteintes sont inférieures à celles mesurées sur les autres éprouvettes.

Eprouvette	Charge ultime [kN]	Moment ultime [kN*m]	Contrainte de flexion [MPa]	Flèche au pic [mm]	Rotation au pic [rad]	Module d'élasticité [MPa]
1flex20*	39.4*	2.46*	14.8*	1.0*	0.008*	27700*
2flex20	67.8	4.24	25.4	3.1	0.028	24300
1flex90	89.4	5.59	33.5	4.1	0.035	17800
2flex90	88.1	5.51	33.0	4.0	0.031	35600
3flex90*	55.4*	3.46*	20.8*	2.1*	0.025*	33900*
4flex90	89.7	5.61	33.6	4.6	0.031	28900

*Tab.5 : valeurs caractéristiques mesurées*

On constate que la présence de fibres métalliques permet d'augmenter le moment résistant de manière sensible par rapport au moment de fissuration (contrainte de flexion = 2.5 – 3 x la contrainte de pic en traction observée lors de l'essai de traction pure (10 MPa)).

Le module d'élasticité sécant est évalué pour une charge de 20 kN qui est encore dans le domaine élastique. Il est calculé en se basant sur la relation qui existe entre la charge et la flèche de la poutre. Le module moyen ainsi calculé vaut environ 28000 MPa.

On constate que la grande déformabilité pénalise le matériau. Pour certains cas, l'aptitude au service serait déterminante pour le dimensionnement.

On constate que le traitement thermique permet d'augmenter la capacité portante de la poutre de façon significative (33 MPa contre 25 MPa) ce qui constitue un gain appréciable.

## 5. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ESSAIS ET AVEC D'AUTRES MATERIAUX

### Résultats M2C de Holcim

Les informations disponibles sur le M2C concernent une formulation légèrement différente (formule D2) de celle utilisée pour nos propres essais dont les résultats ont été présentés au §4 précédent. Cette formulation D2 contient des fibres métalliques de même longueur et en même quantité et permet donc une comparaison.

La résistance en compression sur cube (150x150 x150 mm) est égale à 182 MPa. En admettant la relation suivante entre les résistances sur cube et sur cylindre :

$$f_{c,cyl} \approx 0.85 \cdot f_{c,cube}$$

la résistance sur cylindre équivalente vaut 155 MPa. Cette valeur est inférieure à celle observée avec la nouvelle formulation (résistance sur cylindre de 177 MPa).

Les essais de flexion sur prisme (500x100x100 mm) montrent une contrainte de flexion maximale de 30 MPa. Cette valeur correspond approximativement aux valeurs obtenues durant la campagne d'essais. Le comportement est également constitué de trois phases distinctes comparables à celles observées avec la nouvelle formulation.

### Résultats BPR200

Le matériau testé est assez proche du béton de poudres réactives développé chez Bouygues dans les années 1990 qui a donné naissance au Ductal. Une littérature abondante est disponible sur le comportement de ce matériau.

Comme le montre le tableau suivant, il existe deux différences fondamentales entre le BPR200 et le M2C.

Premièrement, les composants inertes (sable) sont constitués de sable de silice dans le cas du BPR200 alors qu'ils sont constitués de sable de laitier dans le cas du M2C. Deuxièmement, les fibres utilisées pour le BPR200 sont plus courtes ( $l=13$  mm) que les fibres contenues dans la formulation D42T du M2C de notre série d'essais ( $l=25$  mm).

Ciment CPA 55 HTS	950 kg/m <sup>3</sup>
Fumée de silice	237 kg/m <sup>3</sup>
Sable de quartz ( $\phi_{\text{moy}} = 250 \mu\text{m}$ )	997 kg/m <sup>3</sup>
Superplastifiant	17 kg/m <sup>3</sup>
Fibres métalliques ( $l=13$ mm)	146 kg/m <sup>3</sup>
Eau	180 kg/m <sup>3</sup>

Tab.6 : *formulation du BPR200 avec traitement thermique (Annales N°532, Dugat,1995)*

Le tableau suivant résume les caractéristiques mécaniques principales des deux matériaux :

Propriété	M2C	BPR200
Résistance à la compression [MPa]	180	200
Module de Young [MPa]	25000-35000	55000-60000
Résistance à la traction [Mpa]	5-10	10
Résistance à la flexion [MPa]	25-35	30-40

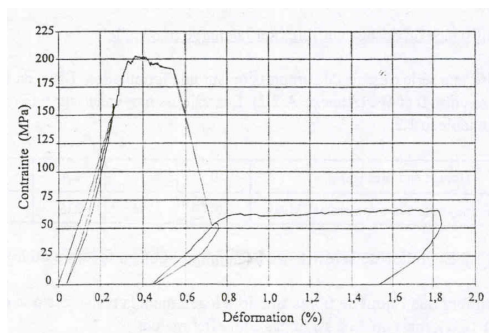
Tab.7: comparaison M2C-BPR200 avec traitement thermique

On constate que les valeurs caractéristiques de ces deux matériaux sont assez proches à l'exception du module d'élasticité qui montre une différence importante. Cette différence s'explique d'une part par la mesure effectuée (mesure sur l'éprouvette à l'aide de jauges de déformation pour le BPR200) qui diffère dans les deux cas, et d'autre part par la nature différente du squelette granulaire (sable).

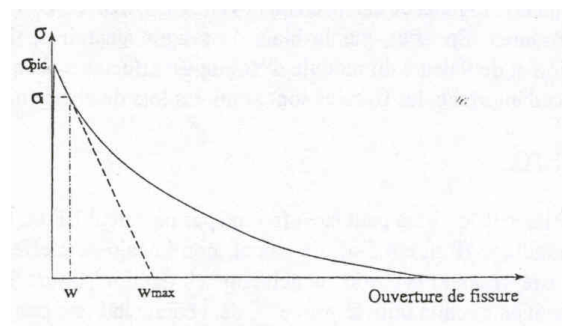
A un niveau qualitatif, le comportement des deux matériaux présente certaines différences dont notamment :

- En compression, le BPR se distingue du M2C de nos essais par la présence d'un palier d'écroutissage une fois la contrainte de pic atteinte. De plus, après la chute de contrainte, la contrainte résiduelle est stable et ne diminue pas, contrairement au M2C qui montre un comportement adoucissant.
- Le comportement à la traction n'est pas identique. Pour le BPR200, la phase linéaire est beaucoup plus importante et le comportement durcissant est quasi inexistant.

La longueur des fibres plus petite a également une influence sur le comportement post-pic. En effet, l'ouverture de fissure correspondant à l'annulation de la contrainte est liée à la longueur d'ancrage minimale des fibres (donc à la longueur des fibres). Celle-ci est donc plus petite pour le BPR200 que pour le M2C.



a)



b)

Fig.23 : comportement du BPR200, a) compression, b) traction

De plus, l'ouvrabilité du BPR200 est nettement meilleure que celle du M2C. Le BPR200 conserve une consistance fluide même après l'introduction des fibres métalliques dans le mélange.

## 6. CONCLUSIONS

Les essais effectués ont permis d'observer le matériau M2C (formule D42T) sous diverses sollicitations mécaniques et d'estimer l'influence d'un traitement thermique sur les réponses à ces sollicitations.

Le tableau 8 résume les différentes caractéristiques qui ont pu être mesurées :

Propriété	Cure à 20°C	Cure à 90°C
Résistance à la compression [MPa]	120	180
Module d'élasticité [MPa]	25000-35000	25000-35000
Résistance à la traction [MPa]	5-10	5-10
Résistance à la flexion [MPa]	25	30-35

Tab.8 : valeurs caractéristiques mesurées

Les essais ont permis de se familiariser avec le comportement du matériau. Ils ont permis une observation qualitative du comportement du matériau dont les principaux points sont résumés ci-après :

- Le traitement thermique a une influence considérable sur certains paramètres du comportement. Notamment, la résistance à la compression et le moment de flexion résistant sont améliorés par une cure spéciale.
- Le module d'élasticité mesuré est très faible et est même inférieur à celui des bétons traditionnels. La présence de laitier en grande quantité, comme liant et surtout comme granulats, peut être à l'origine de cette faible valeur. Néanmoins, des essais plus représentatifs avec mesure des déformations sur l'éprouvette et une étude particulière du laitier seraient nécessaires pour confirmer les résultats obtenus.
- La présence de fibres se traduit par une augmentation de la résistance à la traction du matériau due à la présence d'une phase de multifissuration dans son comportement.
- Les fibres confèrent au matériau une capacité de déformation importante en traction (0.4 % à la contrainte de pic).
- L'ajout de treillis de fibres de verre coulés dans le béton donne des résultats intéressants. La matrice cimentaire permet une très bonne transmission des efforts par adhérence obligeant ainsi les treillis à travailler de façon solidaire avec le béton.

L'observation du comportement permet de faire un certain nombre de considérations sur l'utilisation du M2C dans une structure du Génie civil :

- La résistance élevée à la compression permet d'envisager un gain important sur le poids des structures, facilitant ainsi leur construction et pouvant diminuer leur coût global.
- La grande déformabilité du matériau pénalise son utilisation sous sollicitations de flexion. La souplesse de la poutre rend l'aptitude au service déterminante. Il est préférable de travailler avec un effort centré pour lequel la déformabilité est moins pénalisante (treillis, arcs,...). L'utilisation de systèmes statiques rigides

(grande hauteur statique, systèmes hyperstatiques) est nécessaire pour profiter pleinement des performances de ce matériau.

- La grande déformabilité d'un matériau n'est pas toujours un désavantage. Elle peut être d'un grand intérêt pour certaines applications. Un matériau de très grande résistance ayant un module d'élasticité proche de celui du béton traditionnel permet d'envisager son utilisation comme matériau de renforcement dans des structures en béton armé existantes ou dans des structures mixtes nouvelles (béton traditionnel combiné au BUHP). En effet, la présence de deux matériaux au sein d'un élément induit des problèmes d'entraves liés aux différences de comportement qui existent entre ces deux matériaux, notamment sous déformations imposées. Dès lors que les modules de ces deux matériaux sont proches, ces problèmes sont fortement réduits. L'utilisation d'un tel matériau est également intéressante dans les structures n'ayant pas d'exigences sévères en matière d'aptitude au service.
- L'utilisation des fibres métalliques (surtout celles de grande longueur relative,  $l=25$  mm au lieu de 10-15 mm) dans l'état actuel de la recette est discutable. Les fibres métalliques confèrent une certaine ductilité au matériau et permettent de créer une multifissuration des éléments. Ceci a pour conséquence de répartir la déformation et repousse la formation de macrofissures néfastes pour la durabilité d'une structure.

Néanmoins, l'ouvrabilité du matériau à l'état frais peut être fortement diminuée, comme l'ont montré nos essais, par l'introduction de fibres. La consistance plastique finale constatée n'a pas permis une mise en place facile. La formule du M2C utilisée ici (D42T) mériterait sans nul doute d'être encore optimisée du point de vue de l'ouvrabilité : dosage en eau et/ou en superplastifiant, séquences et durée de malaxage.

De plus, à l'état durci, le matériau doit être manipulé avec précaution puisque des fibres sont présentes à la surface des éléments.

Il a été constaté que les fibres situées à la surface des éléments se corrodent créant ainsi une fine couche de béton dégradé qui pourrait avoir des conséquences néfastes sur le comportement des éléments à long terme (aspect, durabilité).

Des essais complémentaires avec une formulation sans fibres métalliques permettraient de quantifier les gains apportés par les fibres sur le comportement global des éléments structurels et de justifier leur emploi dans la formulation.

Ces essais préliminaires constituent une première approche du matériau et de nombreux autres essais sont encore nécessaires pour comprendre de manière plus précise et plus globale le comportement du M2C.

Notamment, la réponse à un effort tranchant (cisaillement) n'a pas pu être examinée durant cette campagne d'essais. Il serait intéressant de mesurer l'influence des fibres sur la résistance à ce type de sollicitation.

Le comportement d'éléments précontraints doit également être analysé et observé puisque l'emploi de câbles de précontrainte semble être la meilleure façon de compenser le manque de résistance à la traction de ces bétons.

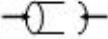
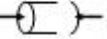



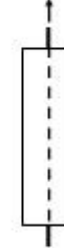
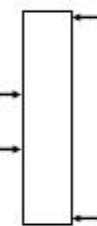
Plus généralement, des essais permettant de caractériser le matériau sous des sollicitations physiques (attaque de chlorures, variations de température,...) devraient permettre d'aborder d'une manière plus globale l'utilisation du M2C en tant que matériau de construction.

## ANNEXES

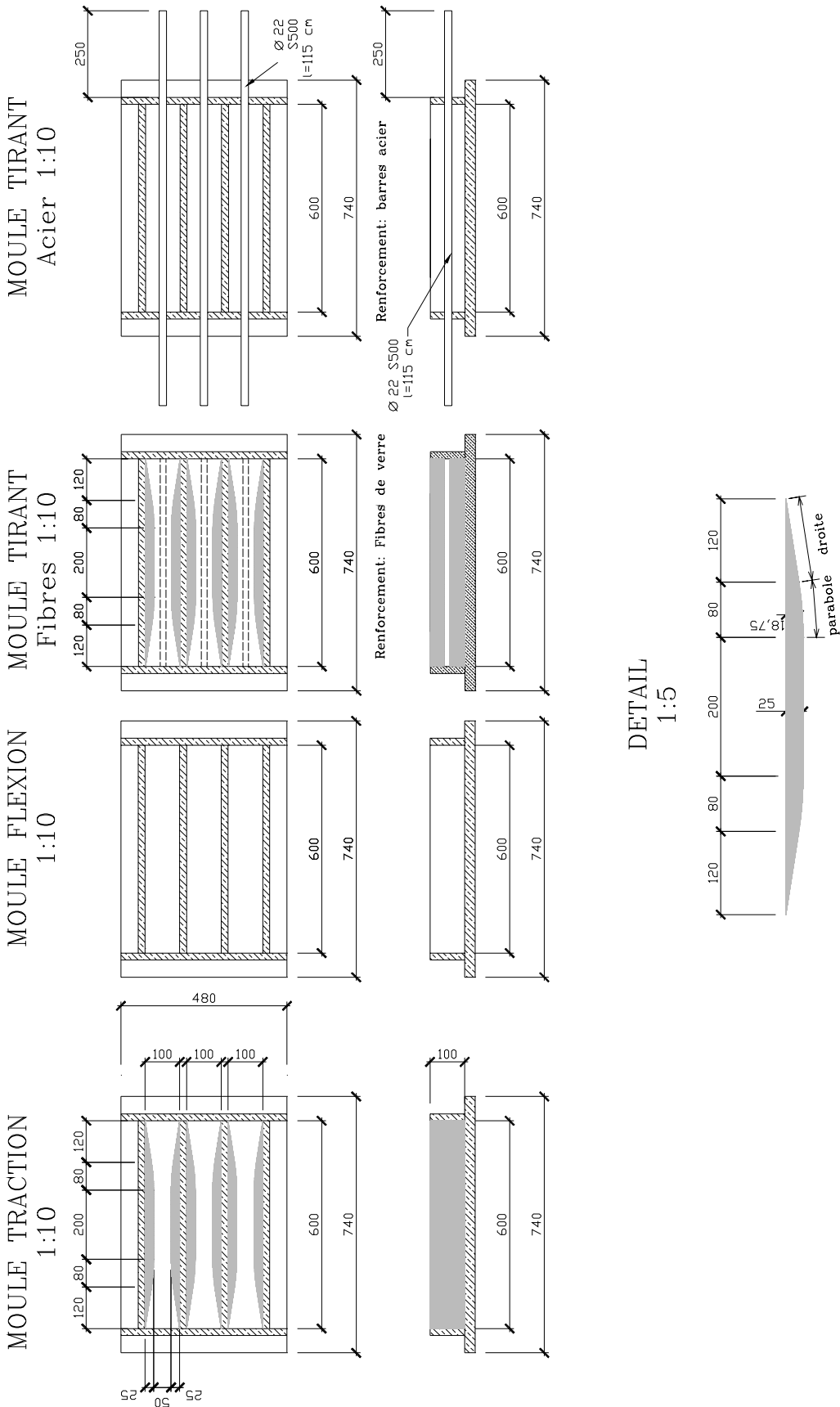
<b>A1.</b>	<b>Préparation des essais</b>	<b>30</b>
A1.1	Planning	30
A1.2	Plan des moules	31
A1.3	Plan de dispositif de l'essai de traction	32
A1.4	Disposition des capteurs	33
<b>A2.</b>	<b>Résultats</b>	<b>34</b>
A2.1	Compression – résistance	34
A2.2	Compression – module	40
A2.3	Traction pure	41
A2.4	Traction pure avec treillis de fibres de verre	44
A2.5	Traction sur tirant armé	47
A2.6	Flexion 4-points	50

# A1. Préparation des essais

## A1.1 Planning

	Eprouvette	Type d'état	Nombre d'éprouvettes	Prote	Traitement des mesures	Capteur	Schéma de mesure	Mesures	Fréquence de mesure	Force max / Déformation max	Chargement / Durée par éprouvette	évaluation
1		Compression sur cylindre	2/3	Solek 1MN compression	Spider Camai	Force: interne Déplacement 2+1	Type cylindre	Force Déplacement	2 mesures / sec	Fmax=770 (580) KN U <sub>0.2</sub> =0.5mm U <sub>0.4</sub> =5mm	Ve1=0.1mm/min Ve2=0.5mm/min Vp=1mm/min t=10 - 5 min	Diagramme σ-ε t
2		Modèle élastique sur cylindre	2/3	Solek 1MN compression	Spider Camai	Force: interne Déplacement 2+1	Type cylindre	Force Déplacement	2 mesures / sec	F=2kN F=10F=260	 V=2kN/min t=12 min	Modél. Elastique
3		Traction pure sur tait amé	2/3	Solek 1MN traction	Spider Camai	Force: interne Déplacement 2+2	Type Tiraat special	Force Déplacement Féctres	2 mesures / sec	Fmax=25-50kN U <sub>0.2</sub> =0.05mm U <sub>0.4</sub> =5mm	Ve1=0.01mm/min Ve2=0.05mm/min Vp=1mm/min t=15 min	Diagramme σ-ε t
4		Traction pure sur tait amé avec fibres	2/3	Solek 1MN traction	Spider Camai	Force: interne Déplacement 2+2	Type Tiraat special	Force Déplacement Féctres	2 mesures / sec	Fmax=25-50kN U <sub>0.2</sub> =0.05mm U <sub>0.4</sub> =5mm	Ve1=0.01mm/min Ve2=0.05mm/min Vp=1mm/min t=15 min	Diagramme σ-ε t
5		Traction pure sur tait amé avec barre acier	2/3	Solek 1MN traction	Spider Camai	Force: interne Déplacement 2+2	Type Tiraat barre	Force Déplacement Féctres	2 mesures / sec	Fmax=175kN U <sub>0.2</sub> =0.05mm U <sub>0.4</sub> =2.5mm U <sub>0.4</sub> =10mm	Ve1=0.1mm/min Vp=1mm/min t=15 min	Diagramme σ-ε t
6		Flexion 4 points	2/3	Anstak 1MN flexion	Spider Camai	Force: interne Déplacement 2+1 Fotogrammetrie	Type Tiraat flexion 4 points	Force Déplacement Fotogrammetrie Féctres	2 mesures / sec	Fmax=64kN U <sub>0.2</sub> =2.5mm U <sub>0.4</sub> =15mm	Ve1=0.5mm/min Vp=1mm/min t=15 min	Diagrammes F-t, M-ε Analyse du mode de rupture

A1.2 Plan des moules (pas à l'échelle)

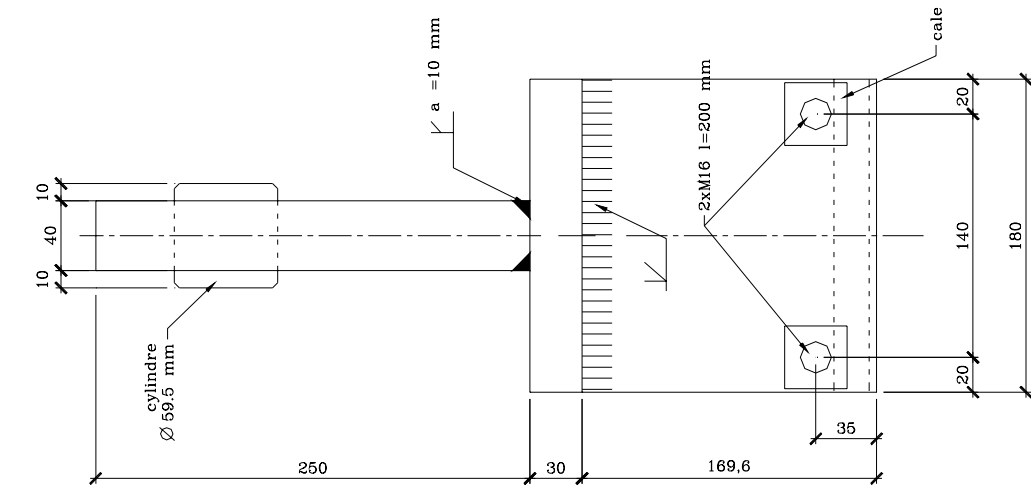




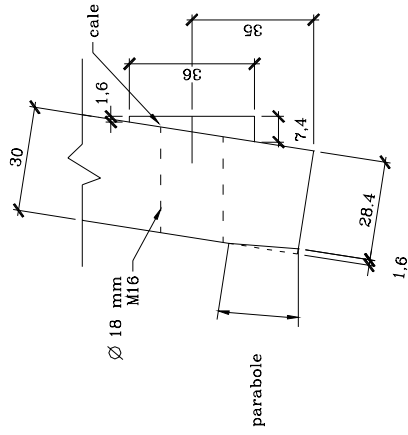
# DISPOSITIF DE SERRAGE

Matériau: FeE355  
cylindre: pièce mécanique en acier haute performance

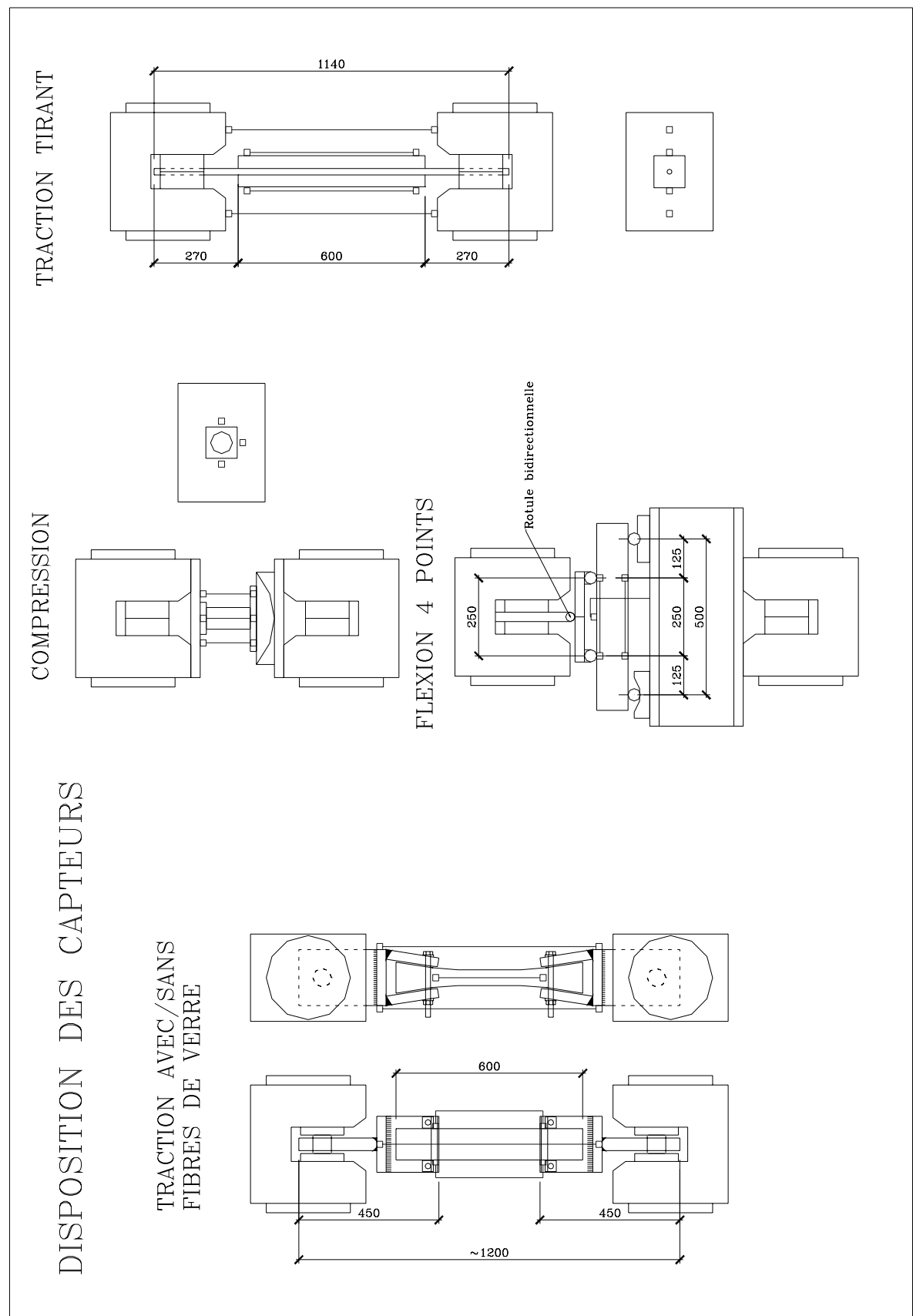
VUES 1:2



DETAIL 1 1:1

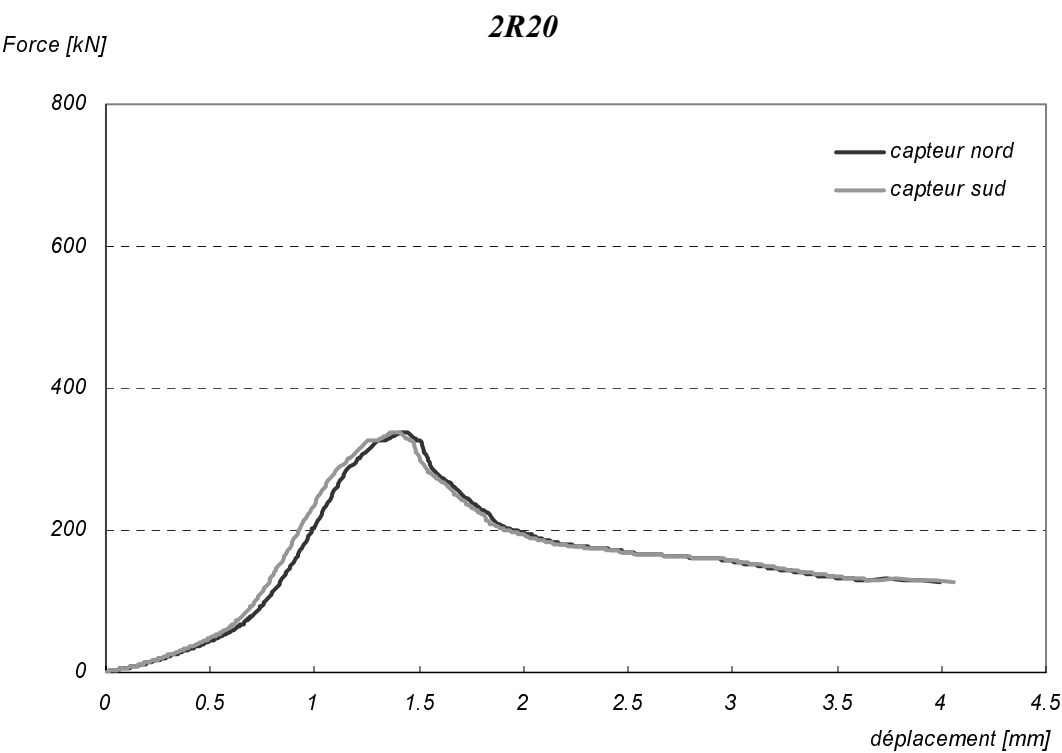
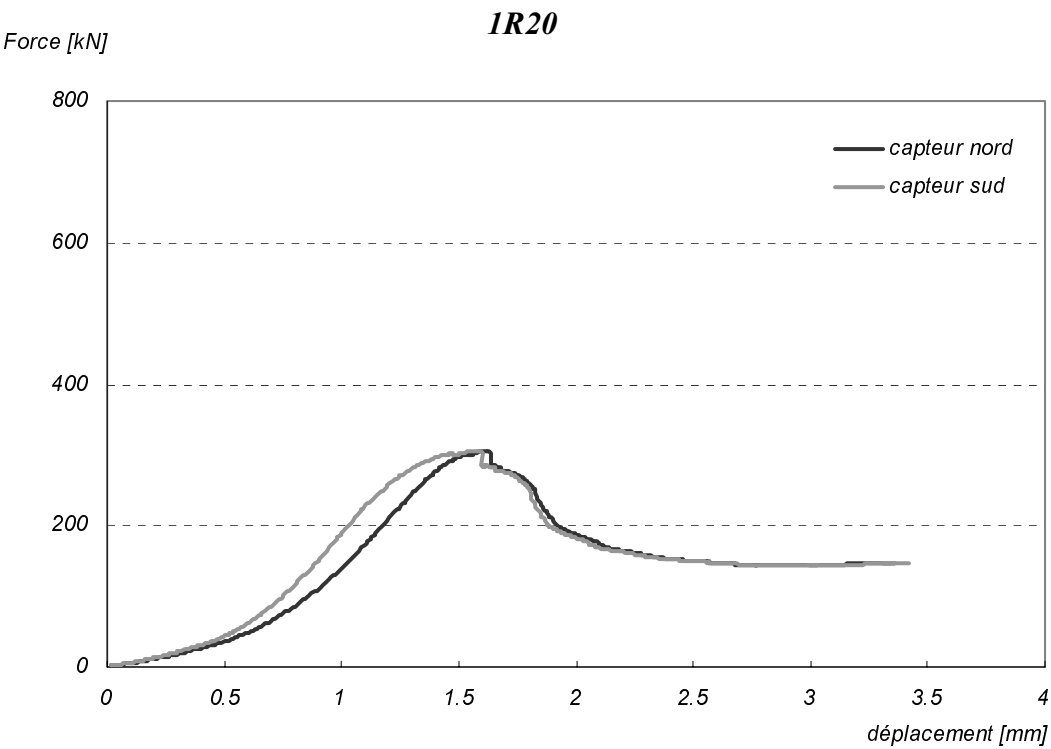


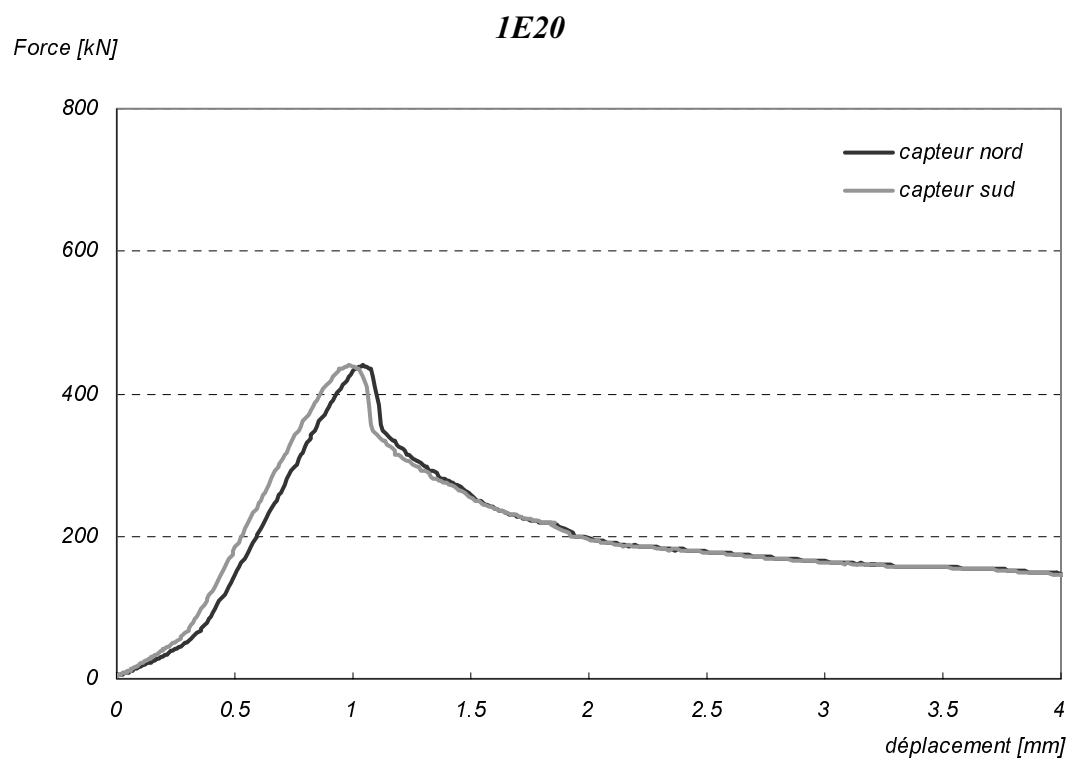
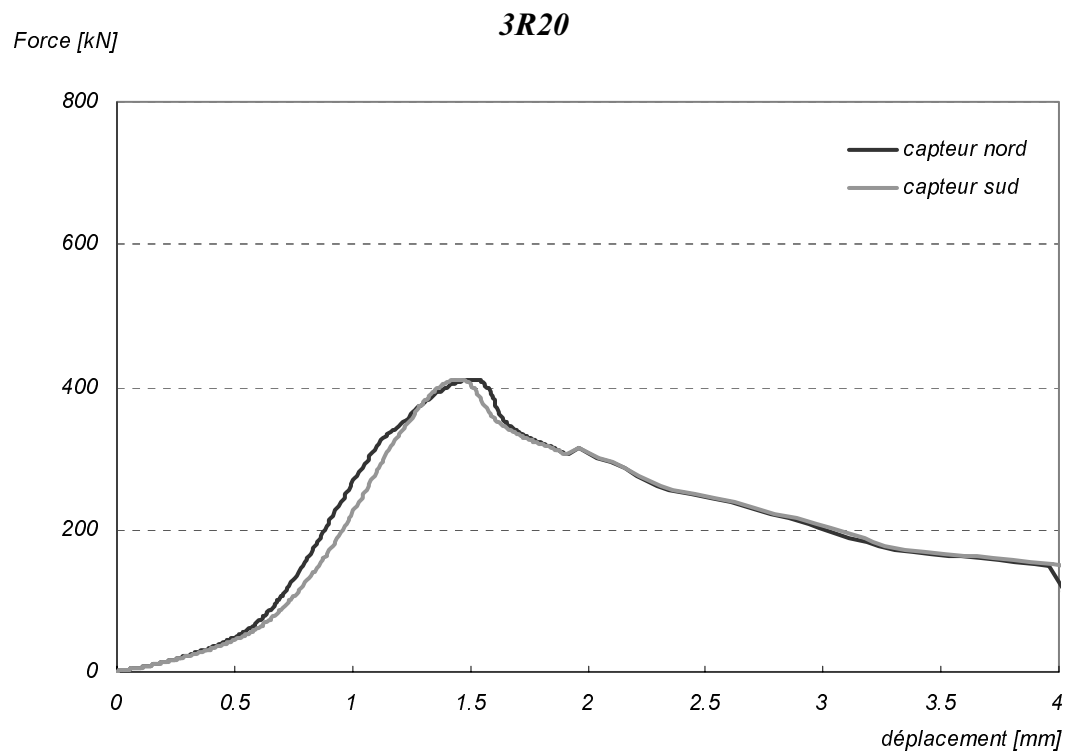
A1.4 Disposition des capteurs

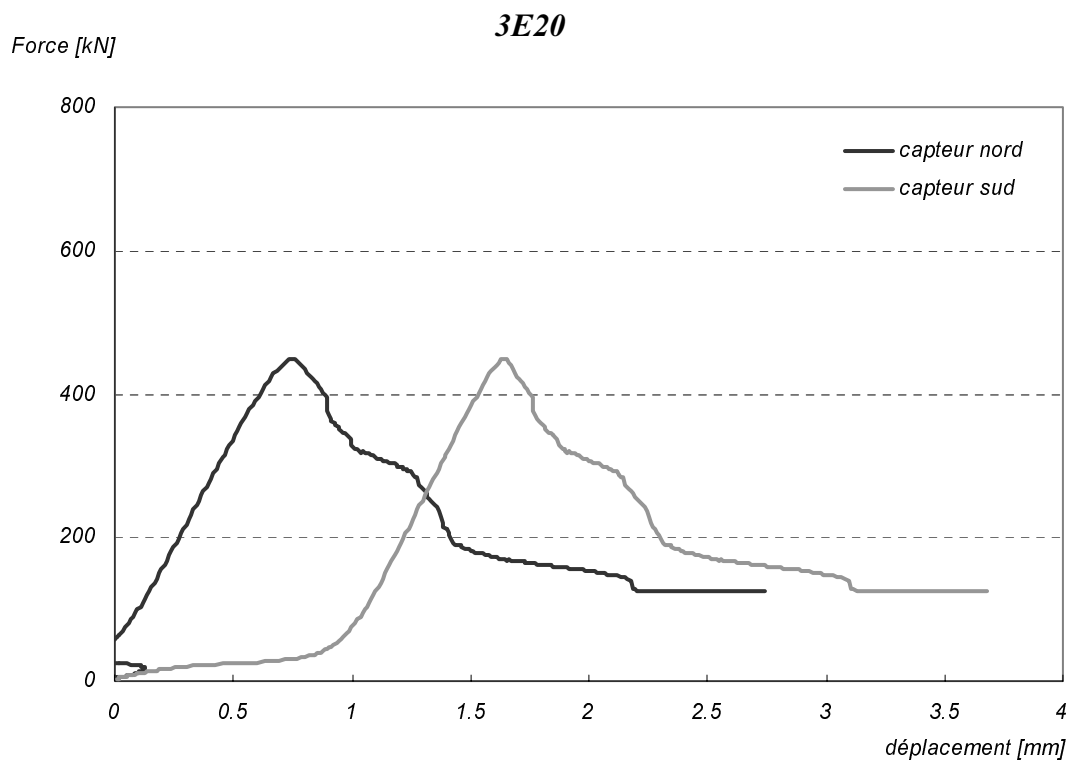
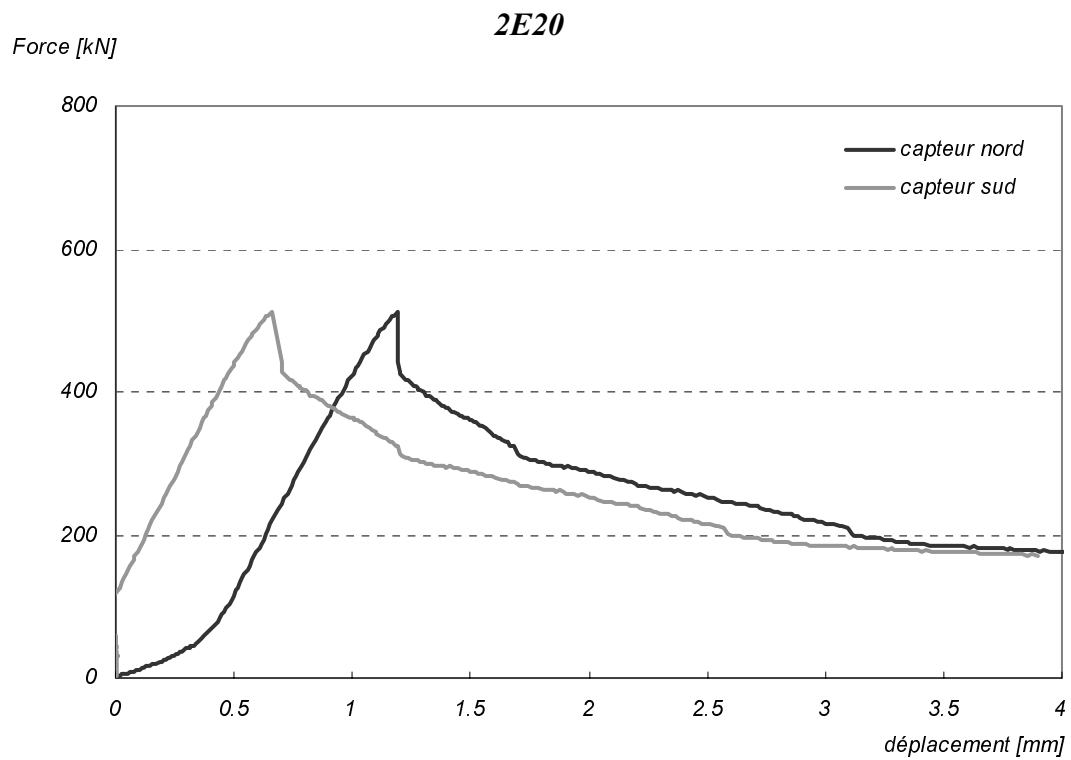


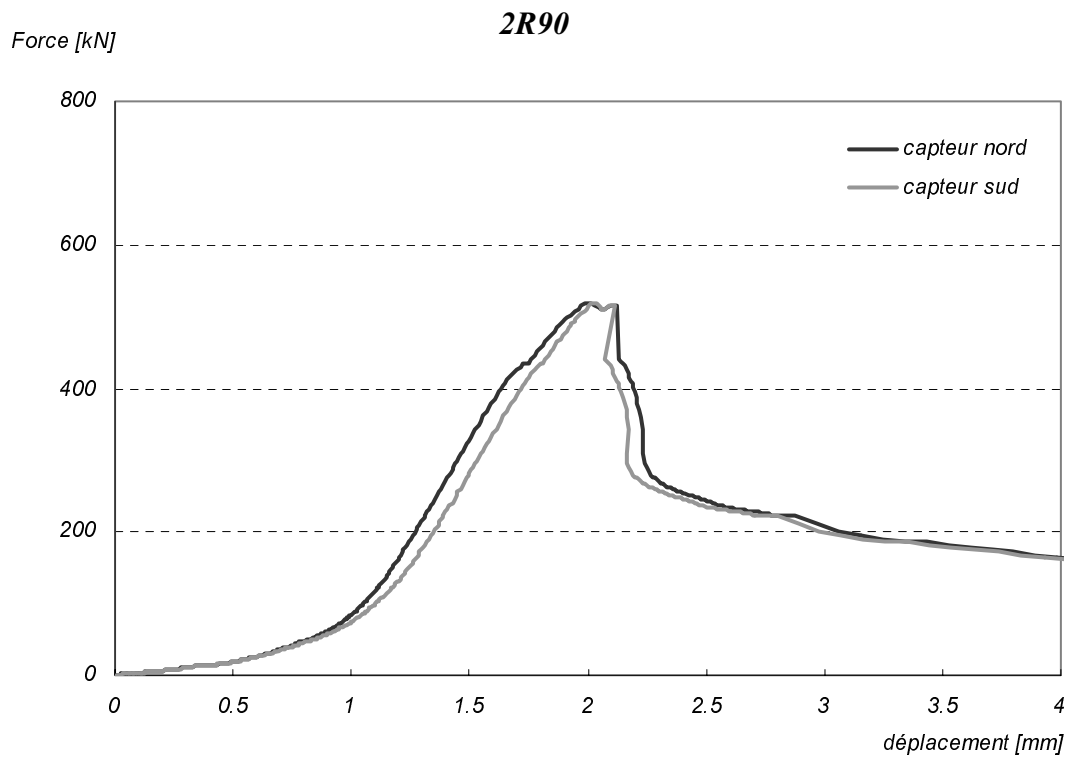
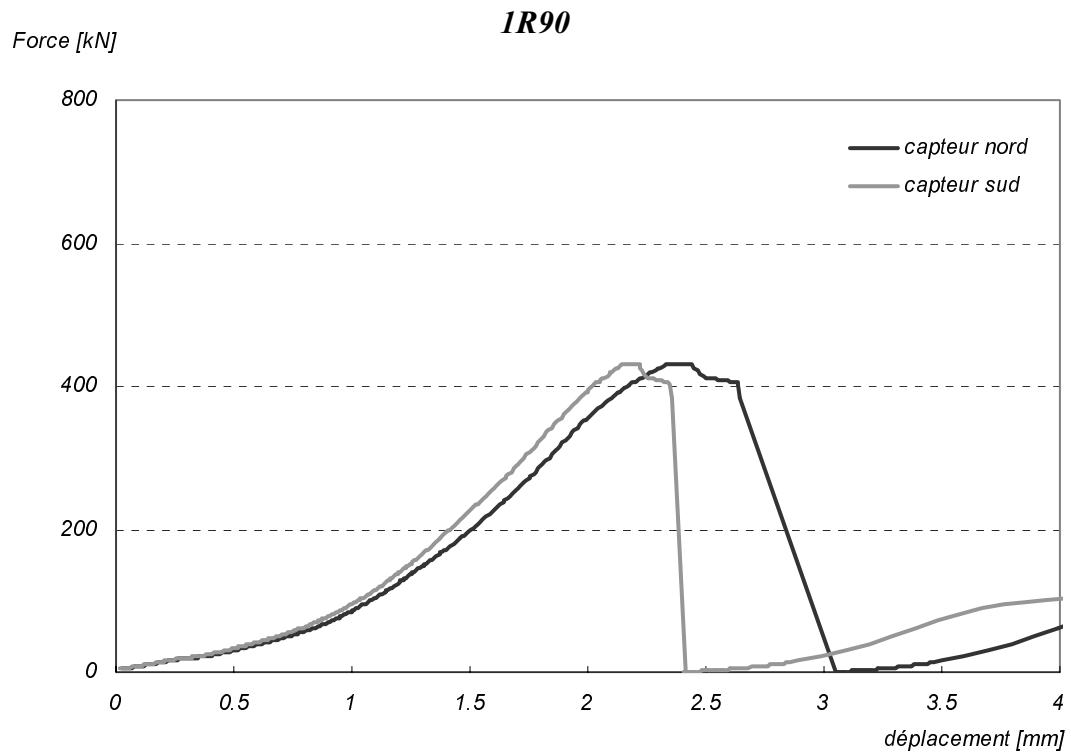
# A2. Résultats

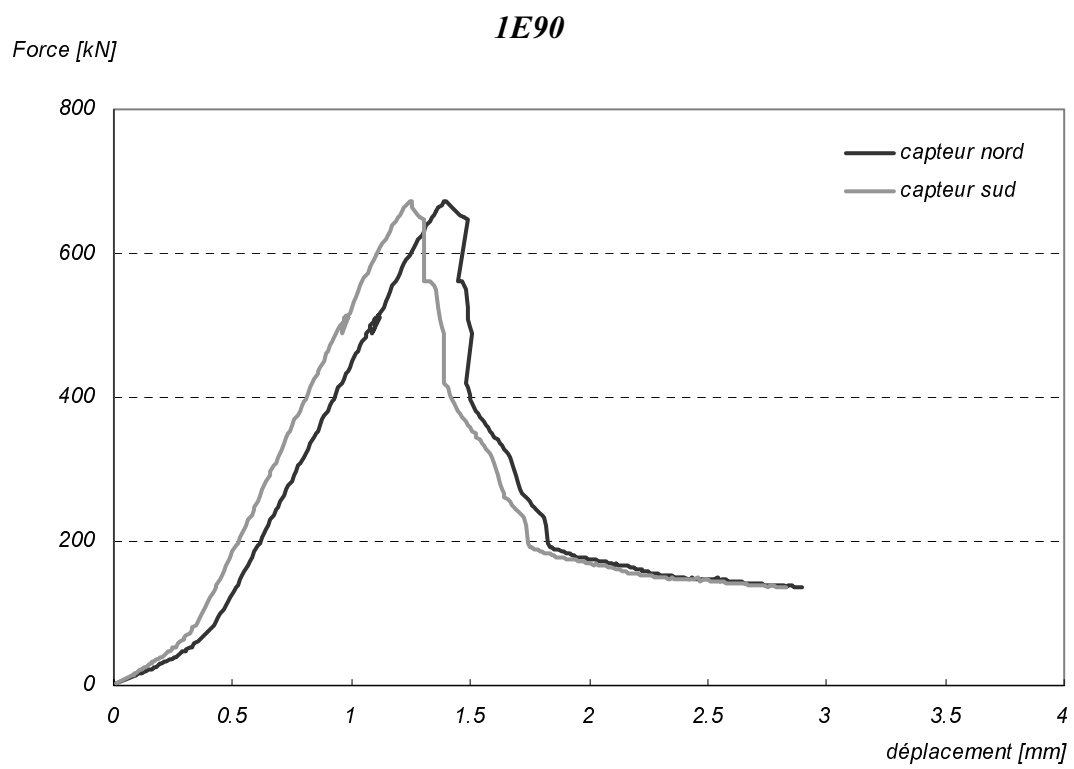
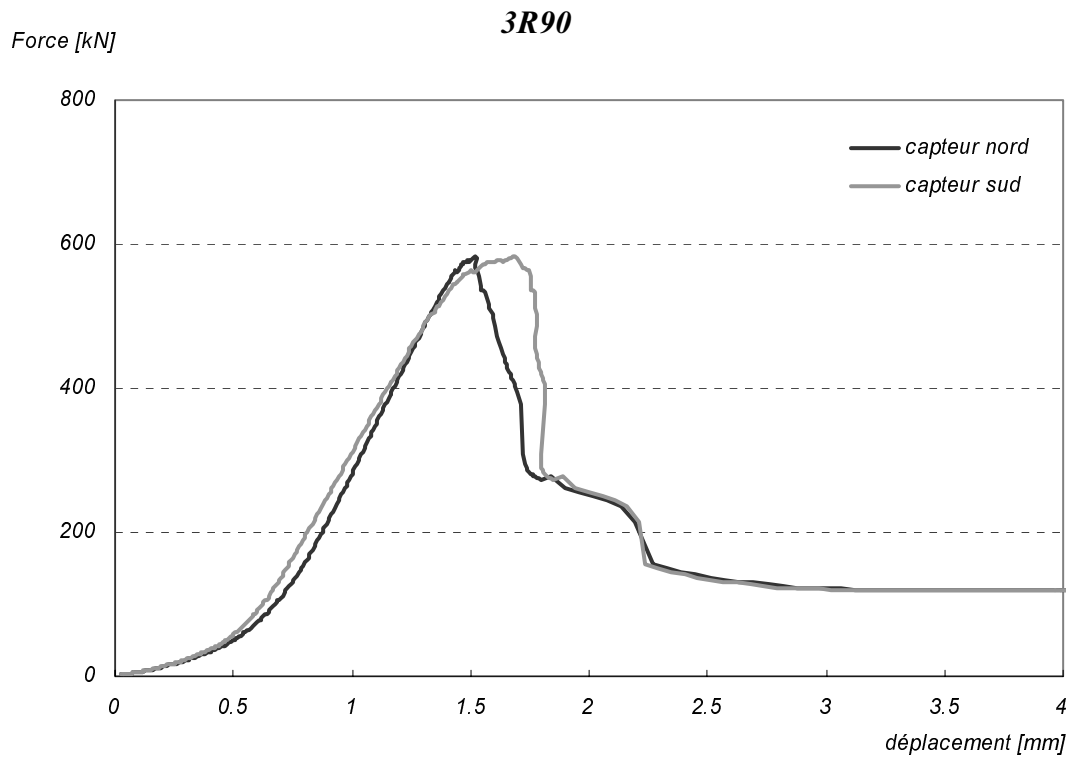
## A2.1 Compression – résistance

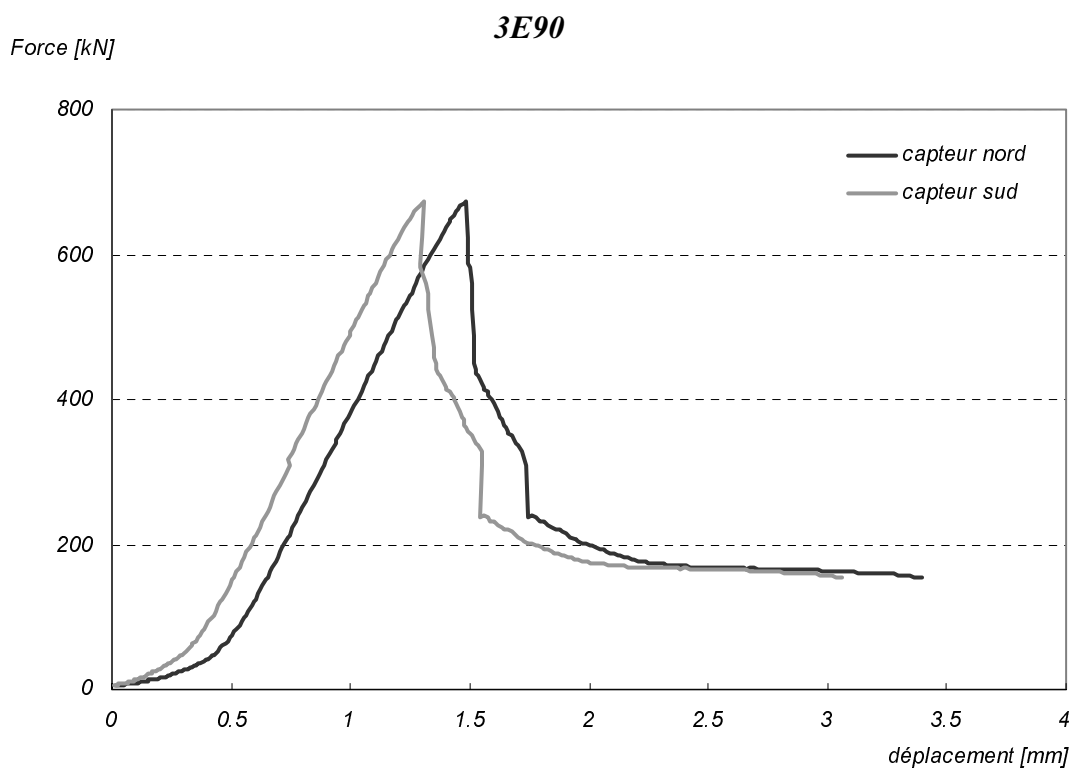
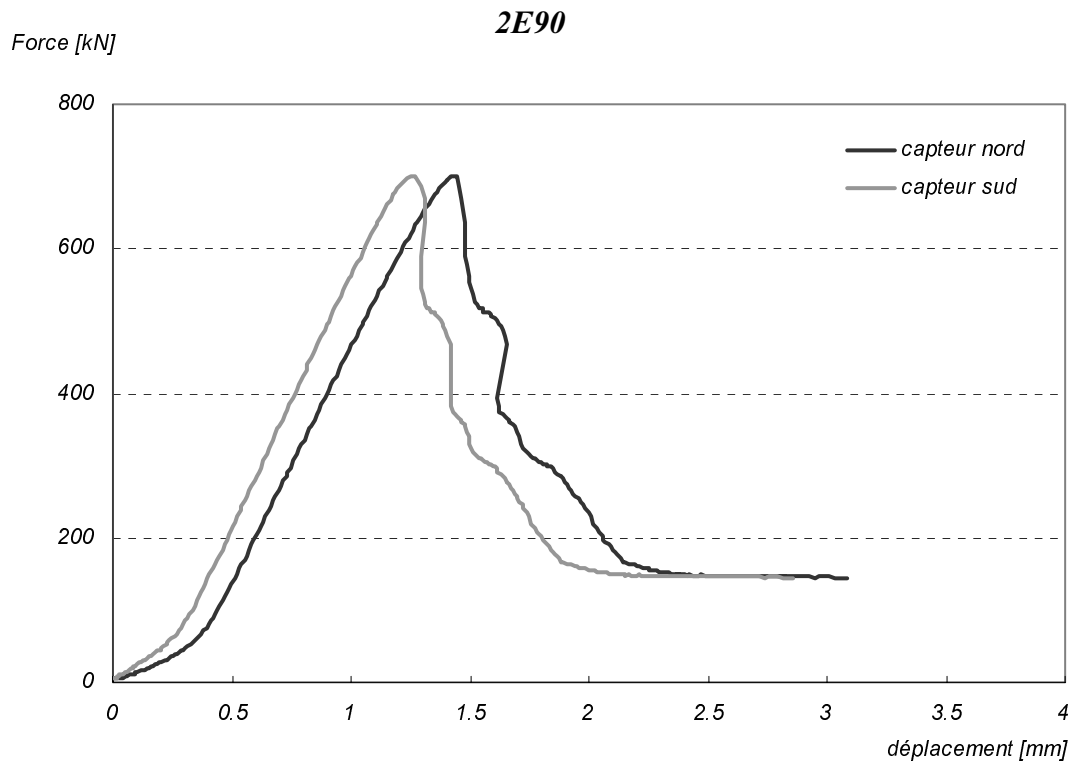






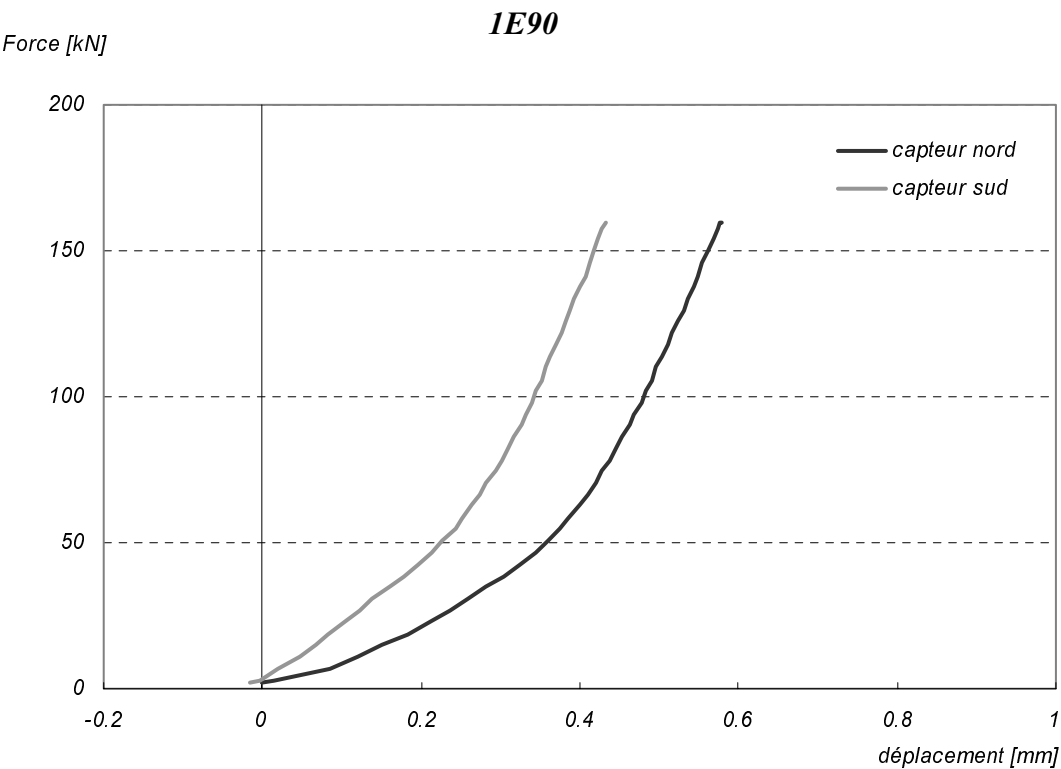
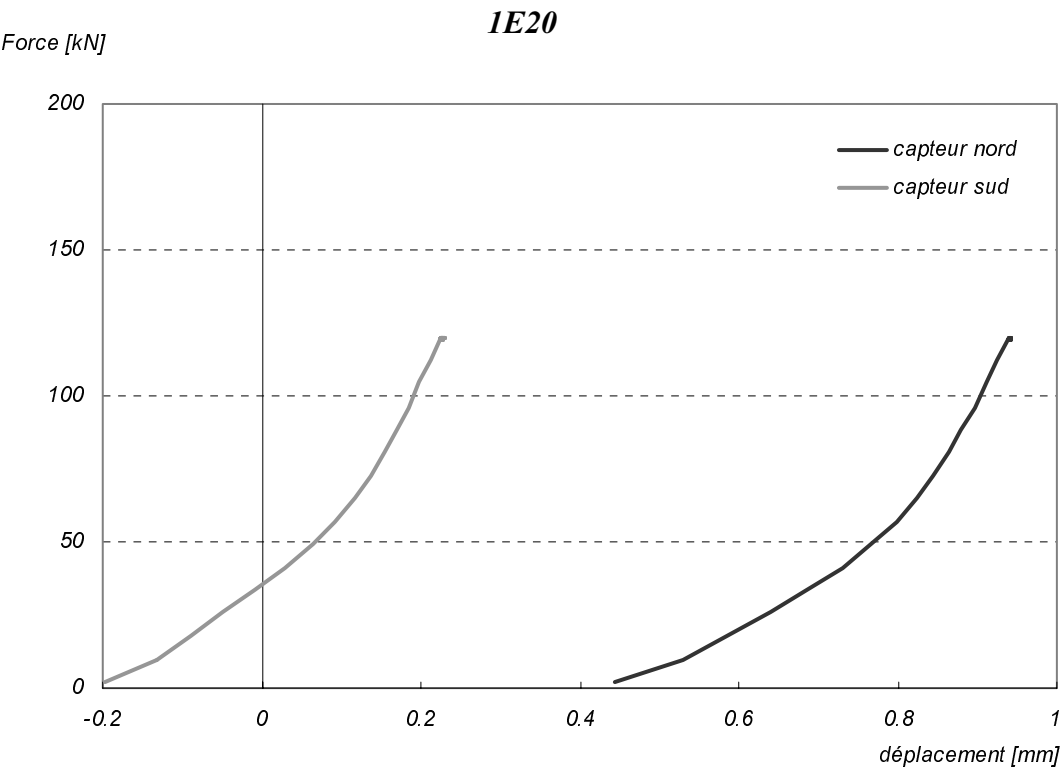




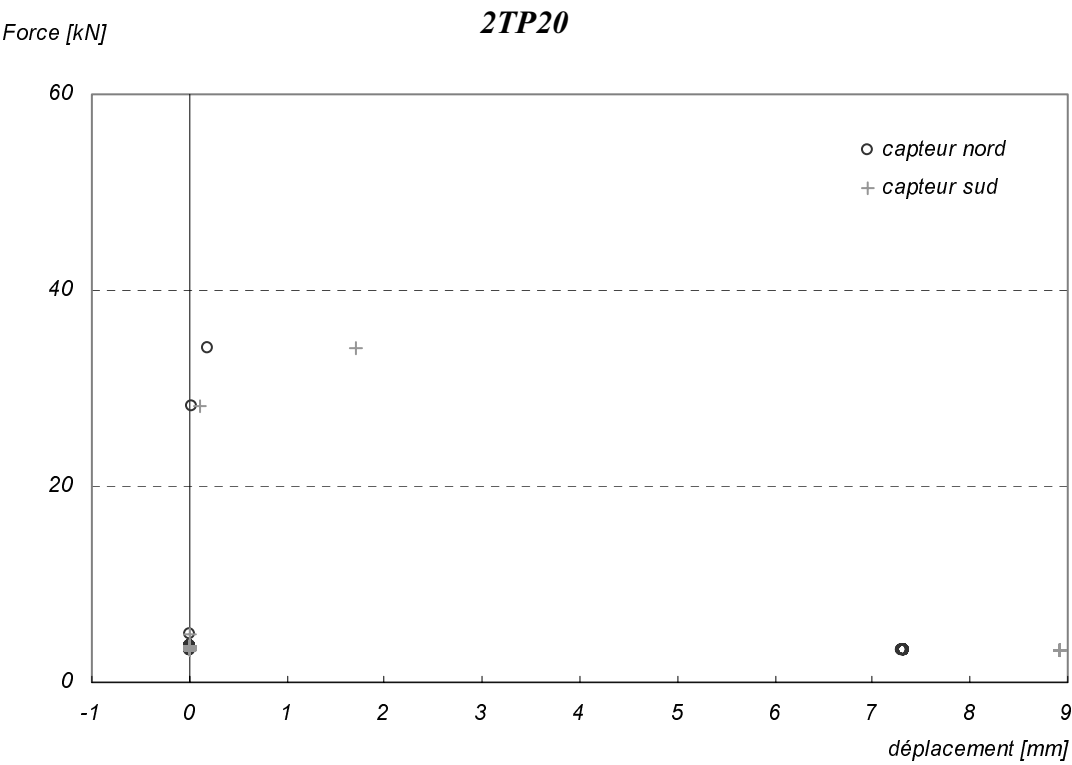
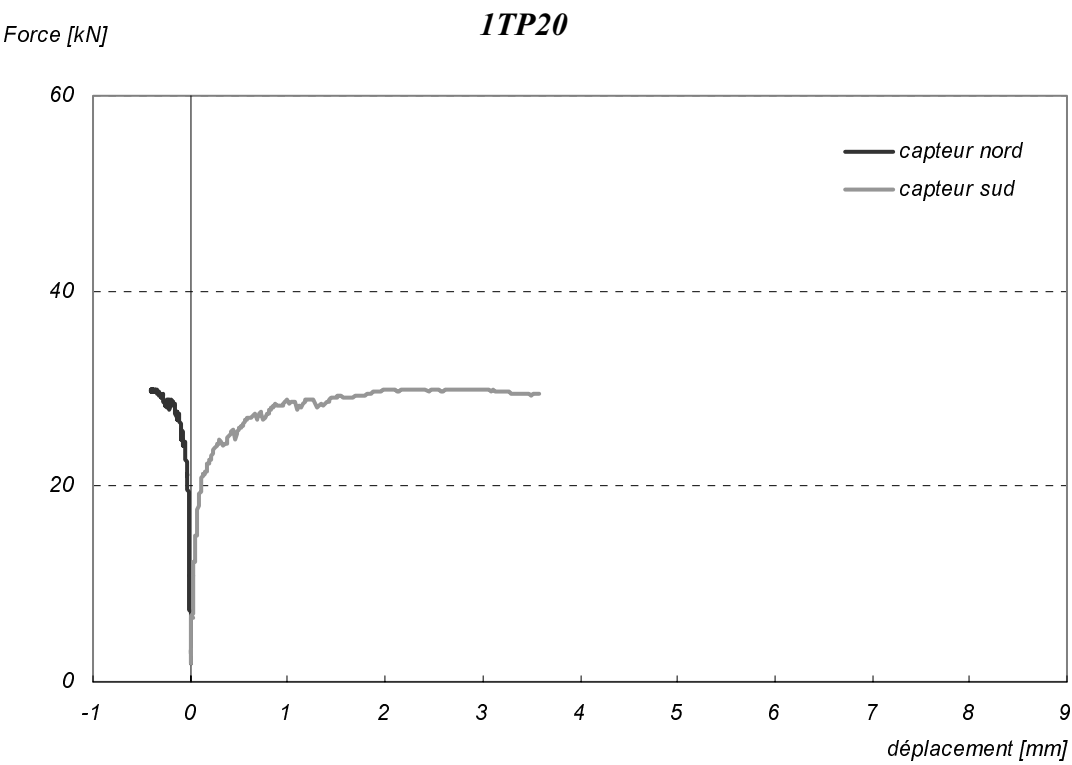


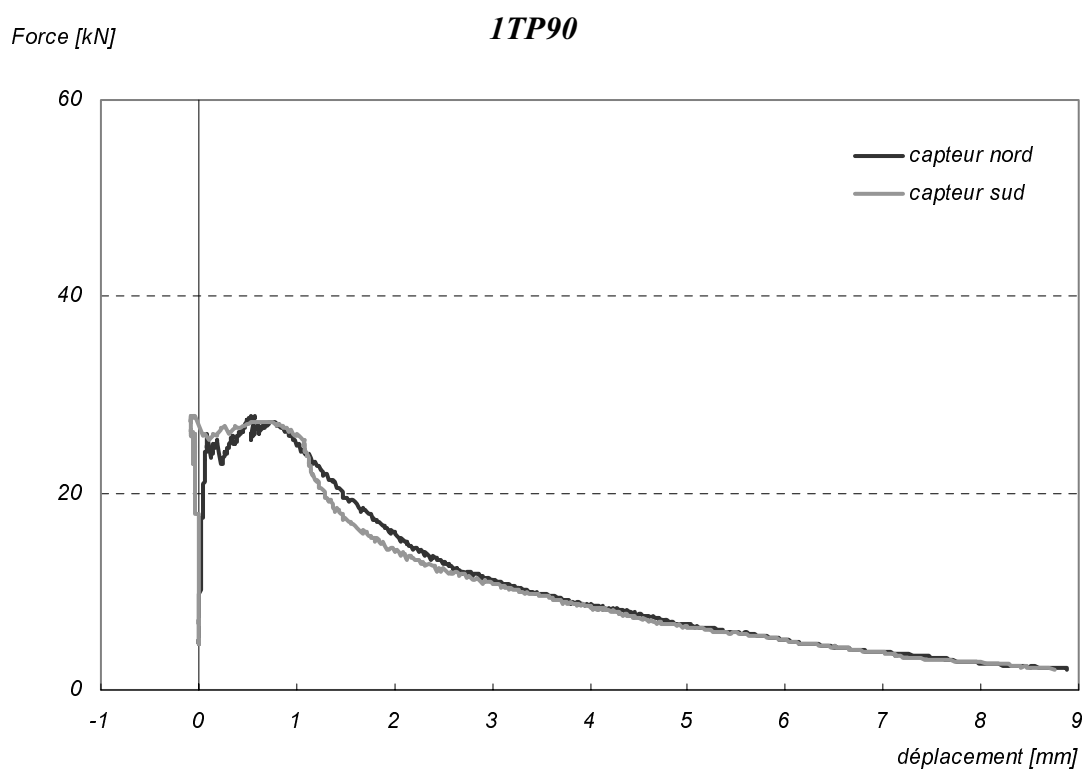
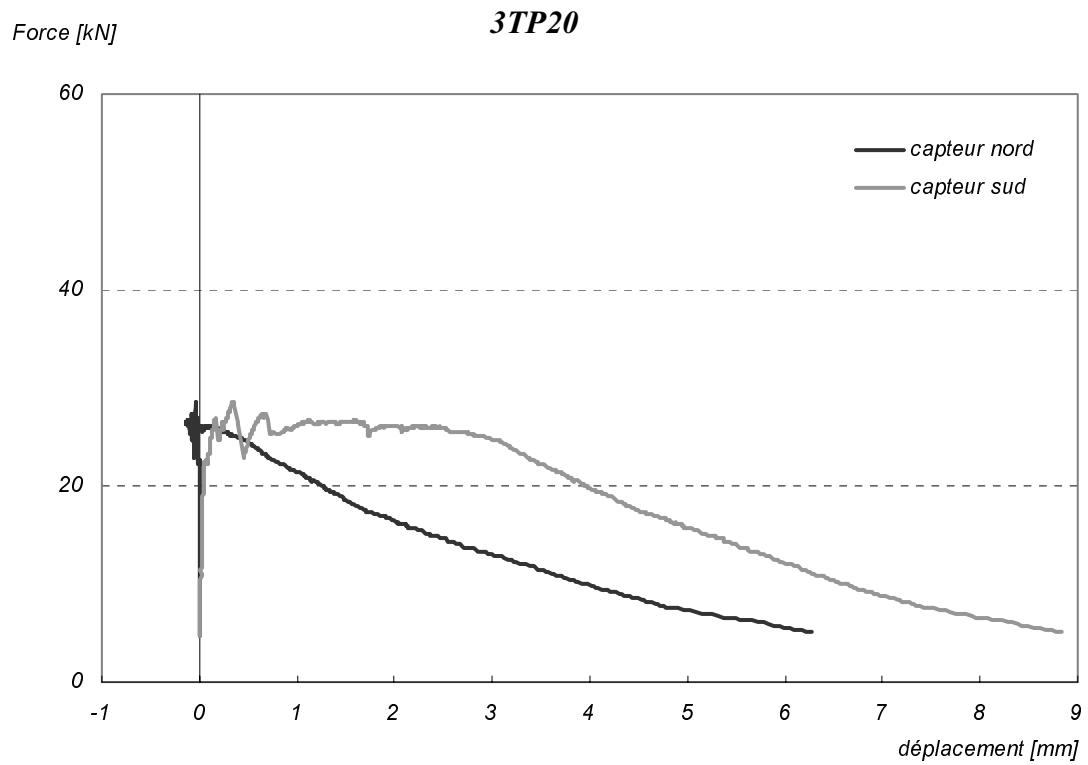


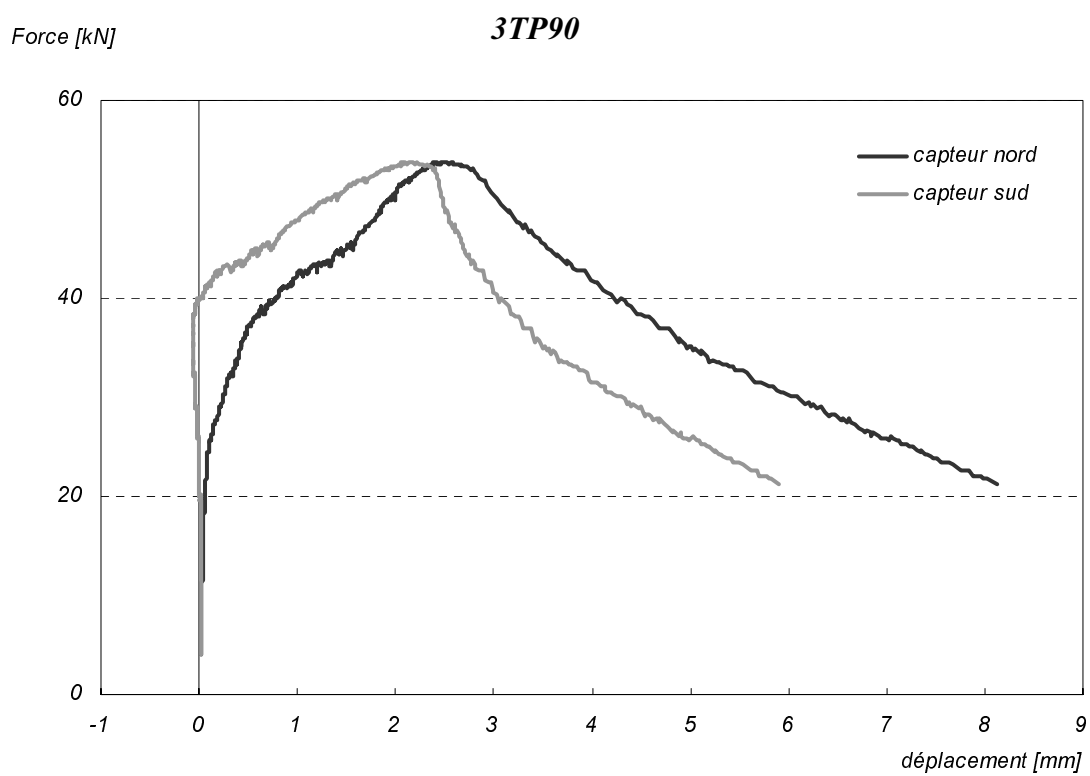
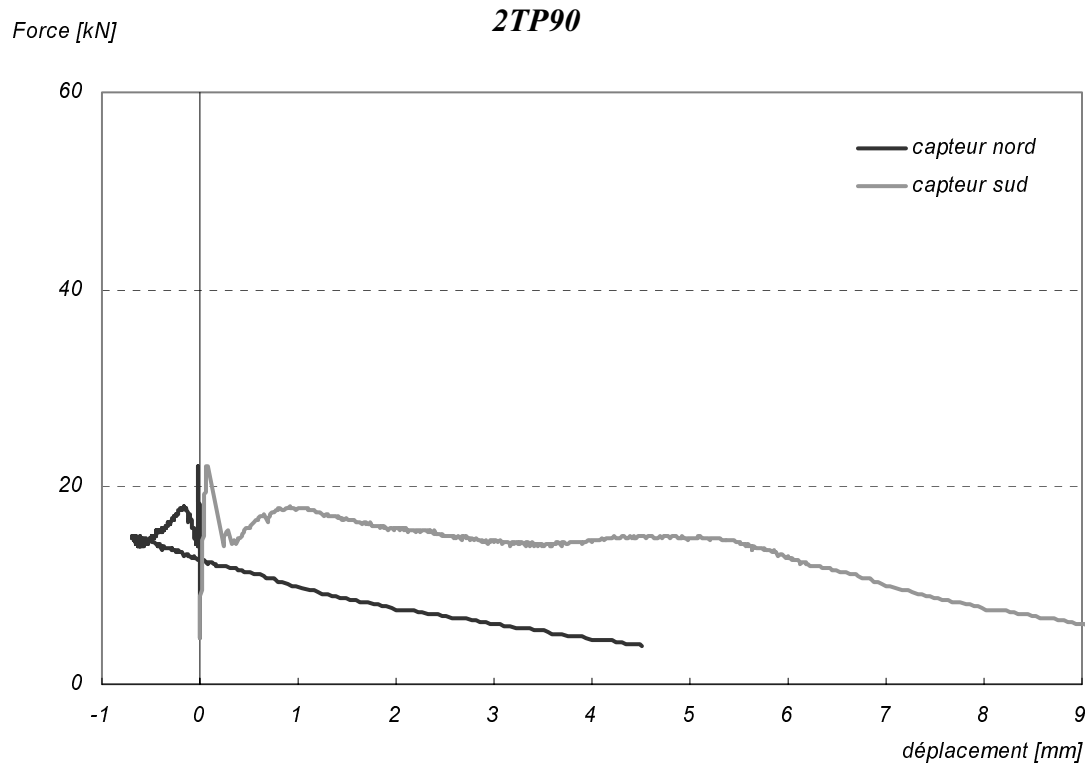
A2.2 Compression – module



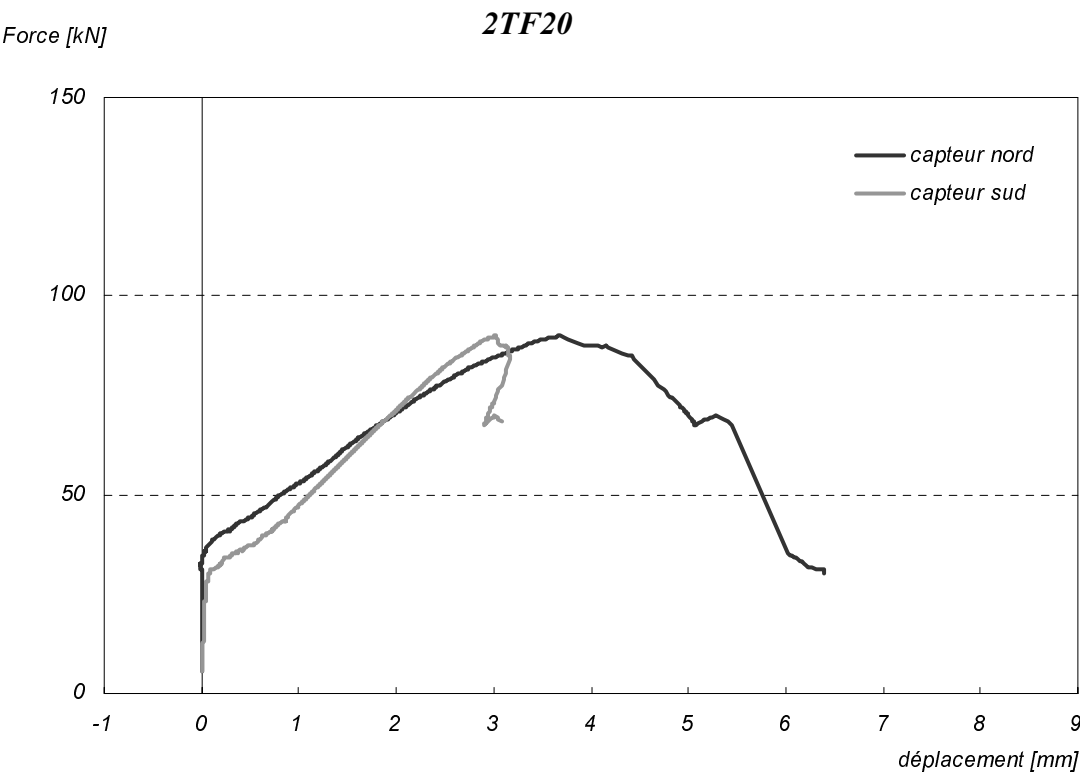
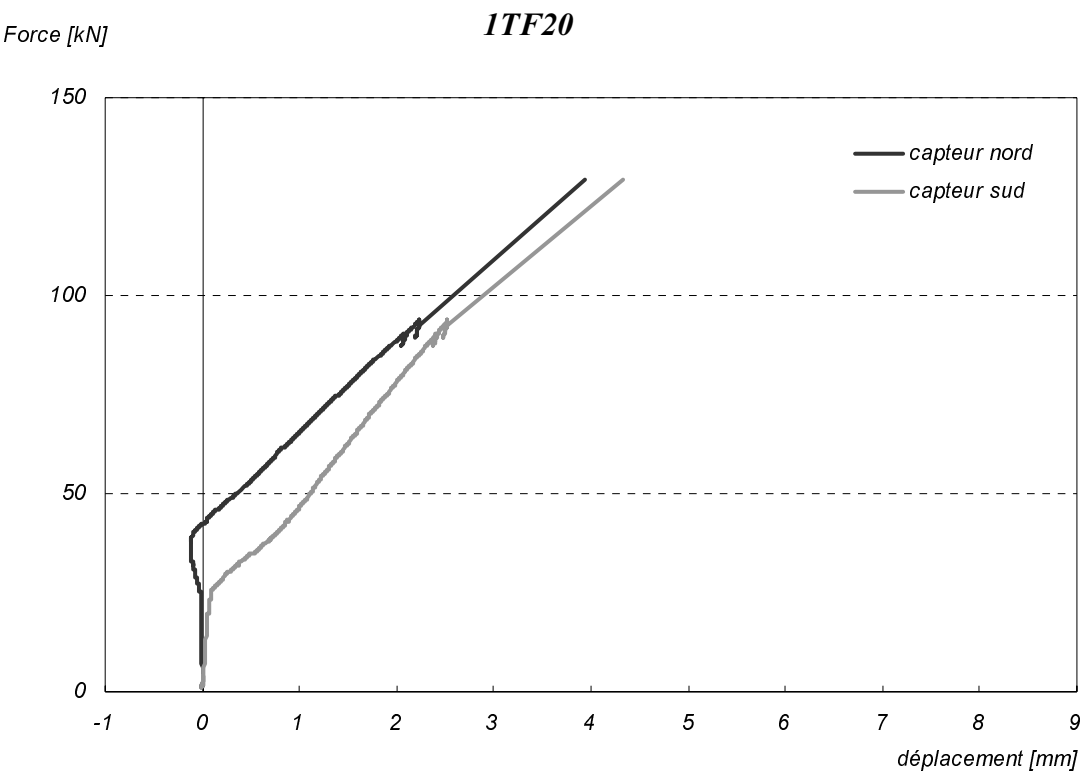
A2.3 Traction pure





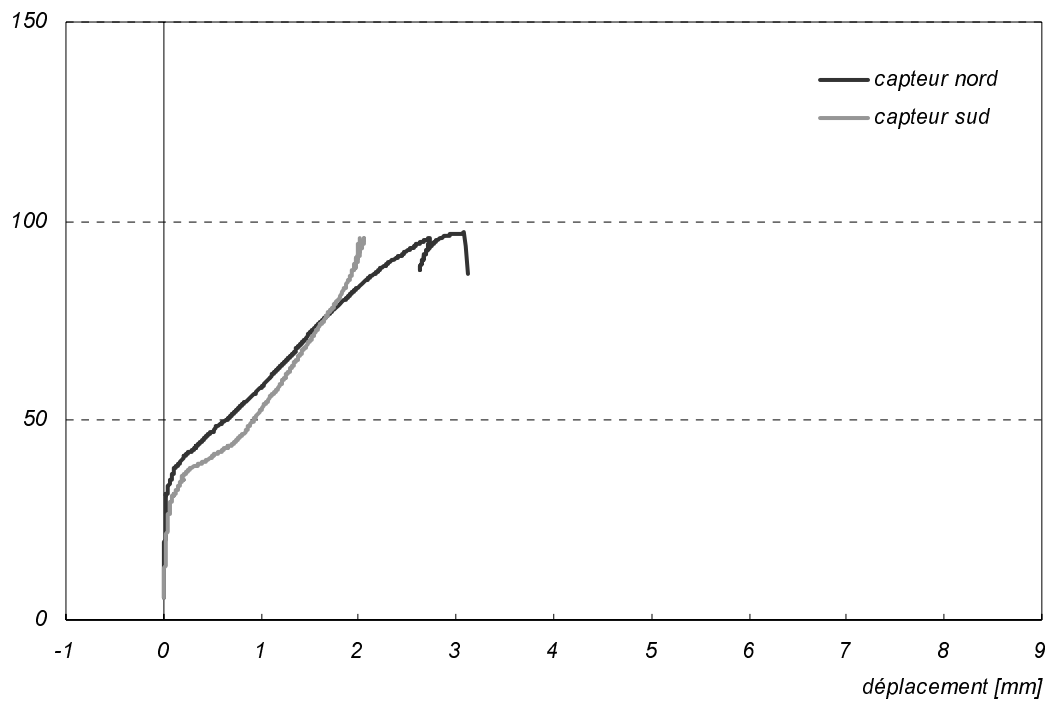


A2.4 Traction pure avec treillis de fibres de verre



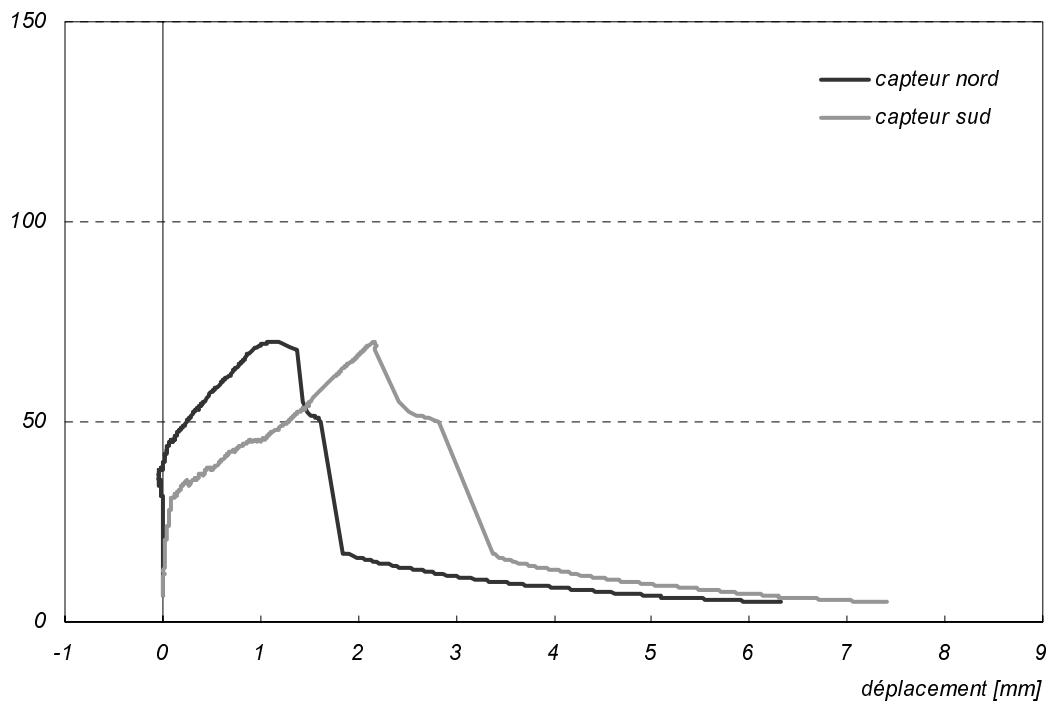
Force [kN]

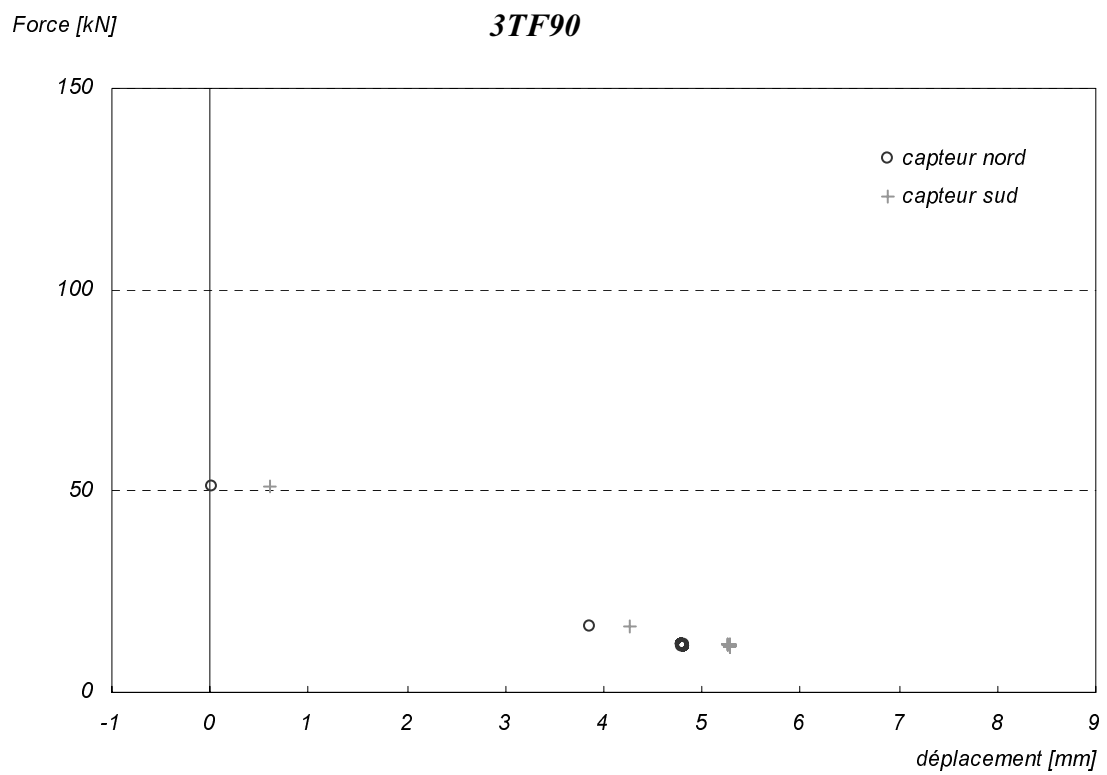
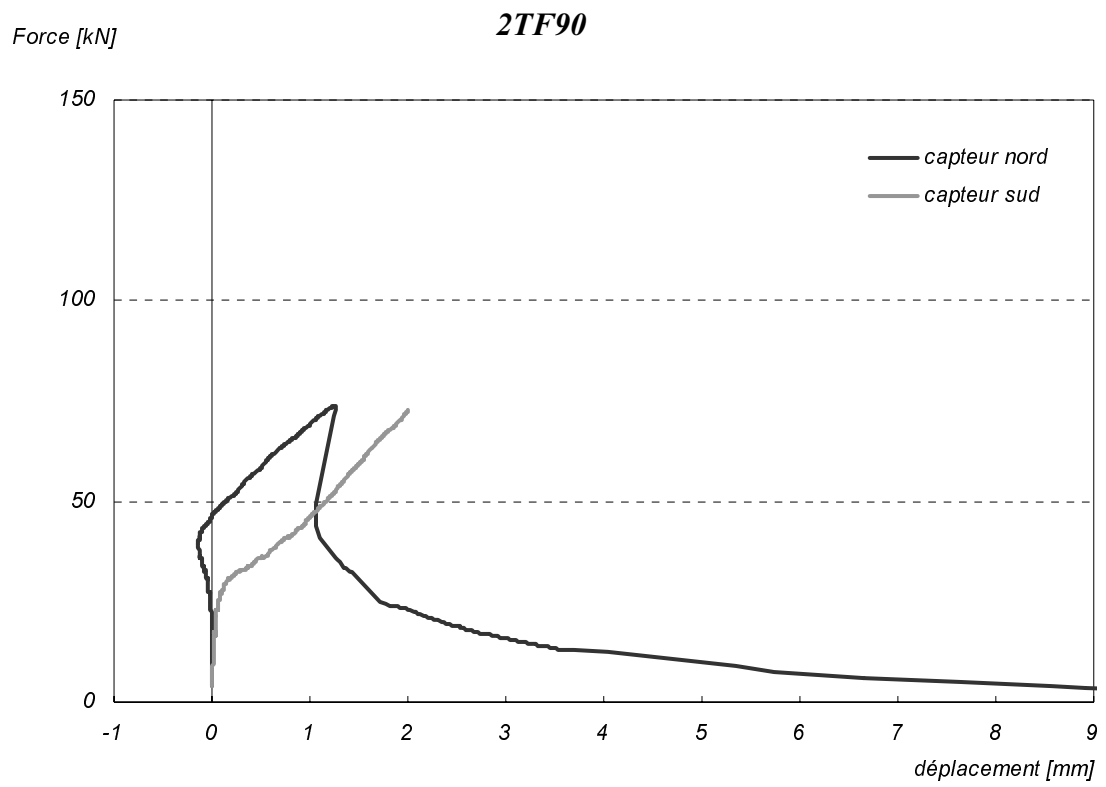
**3TF20**



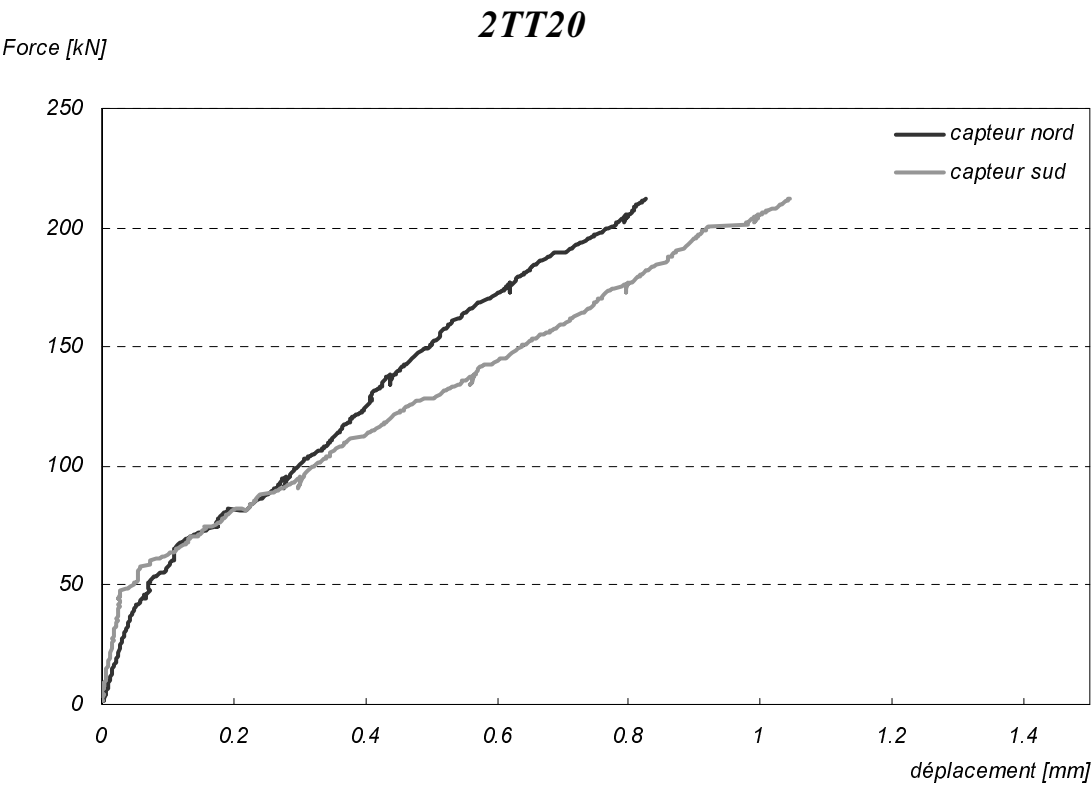
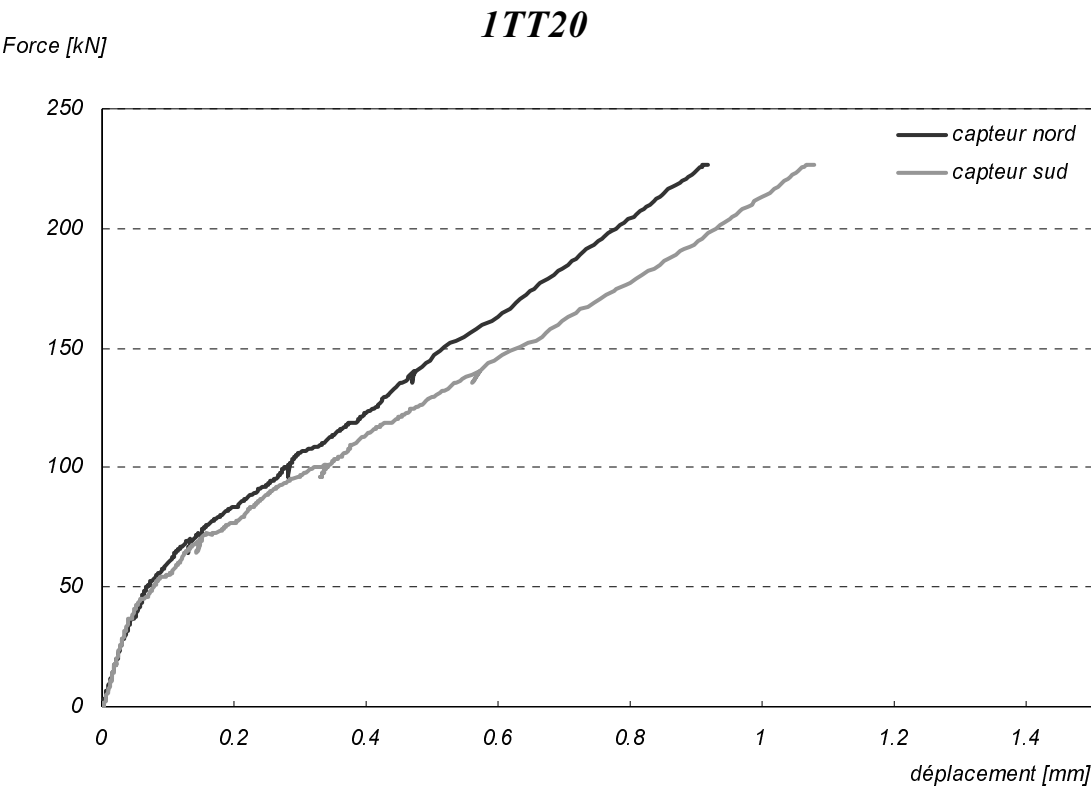
Force [kN]

**1TF90**

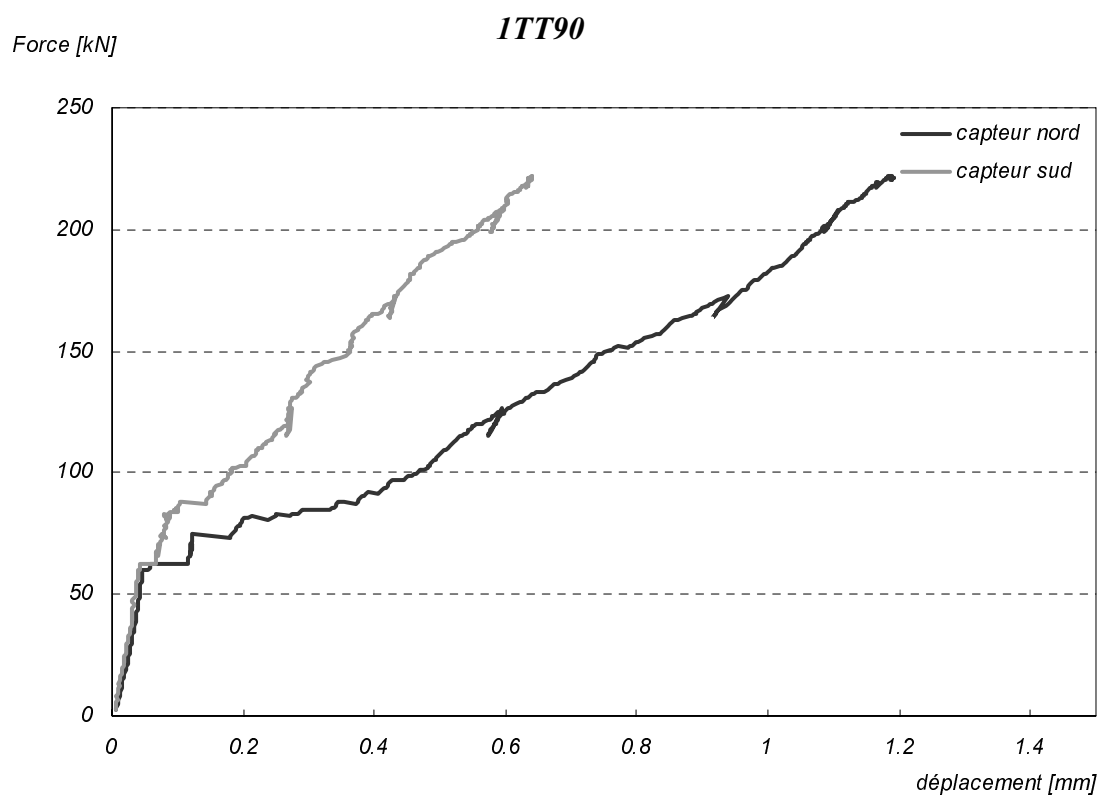
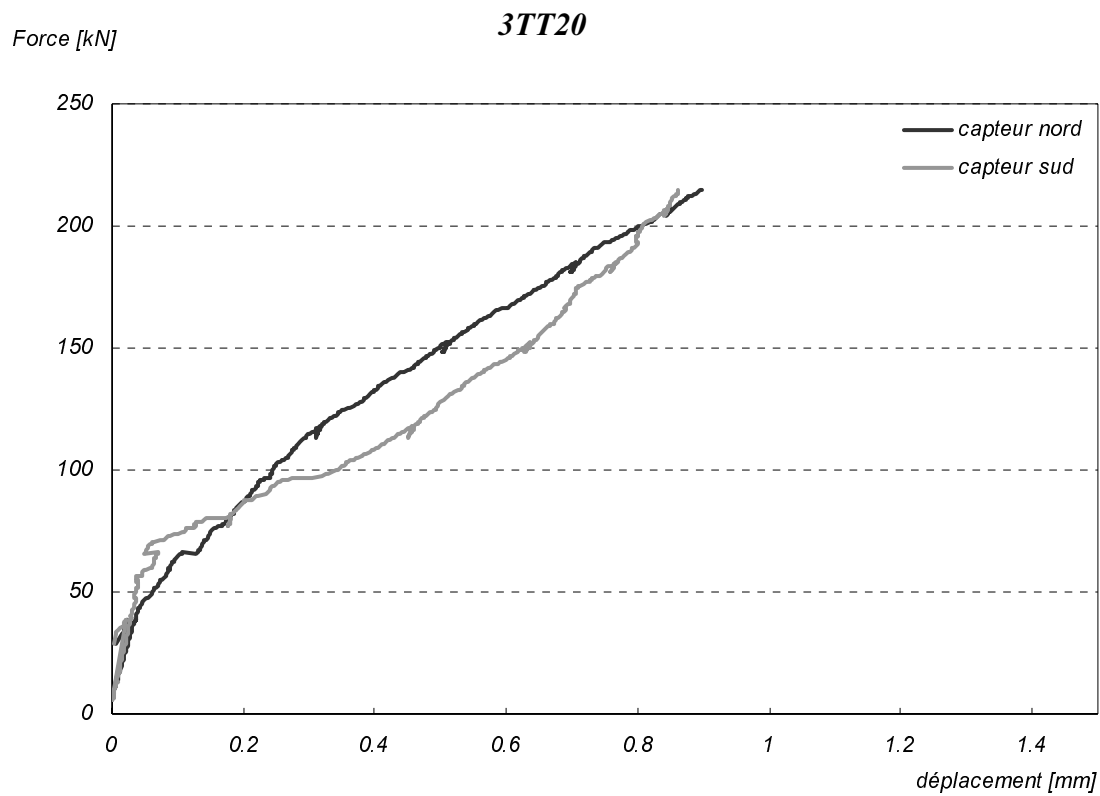


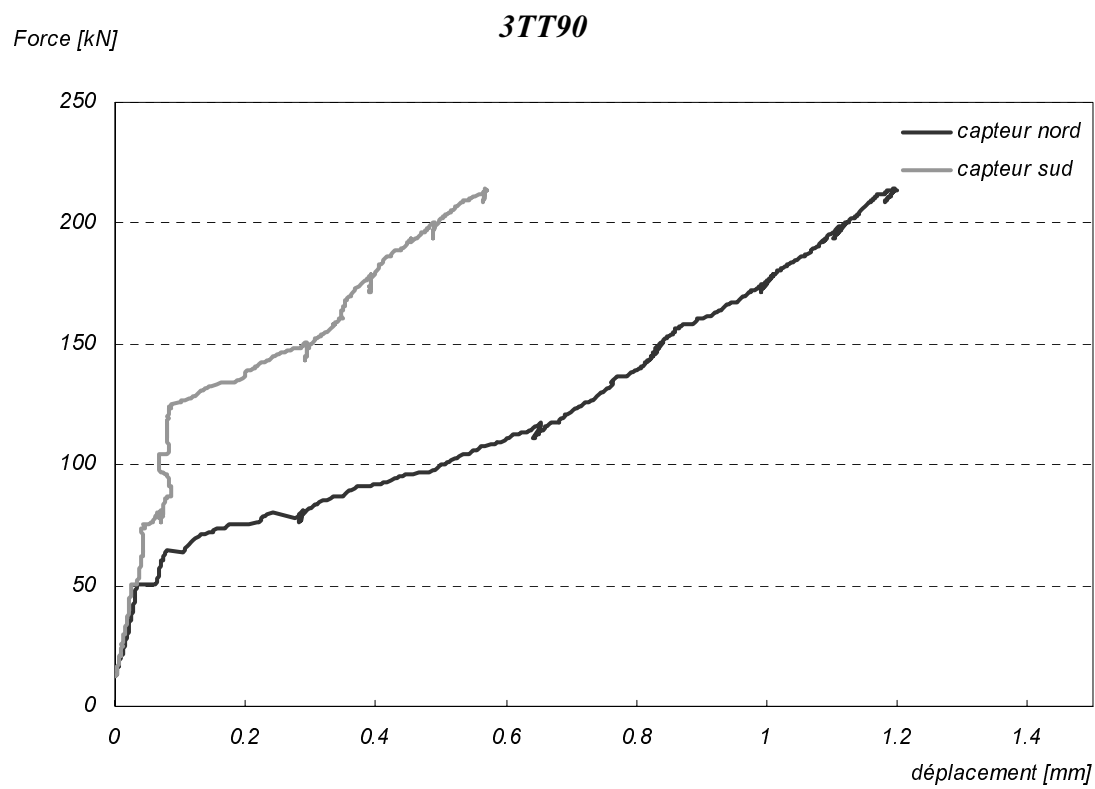
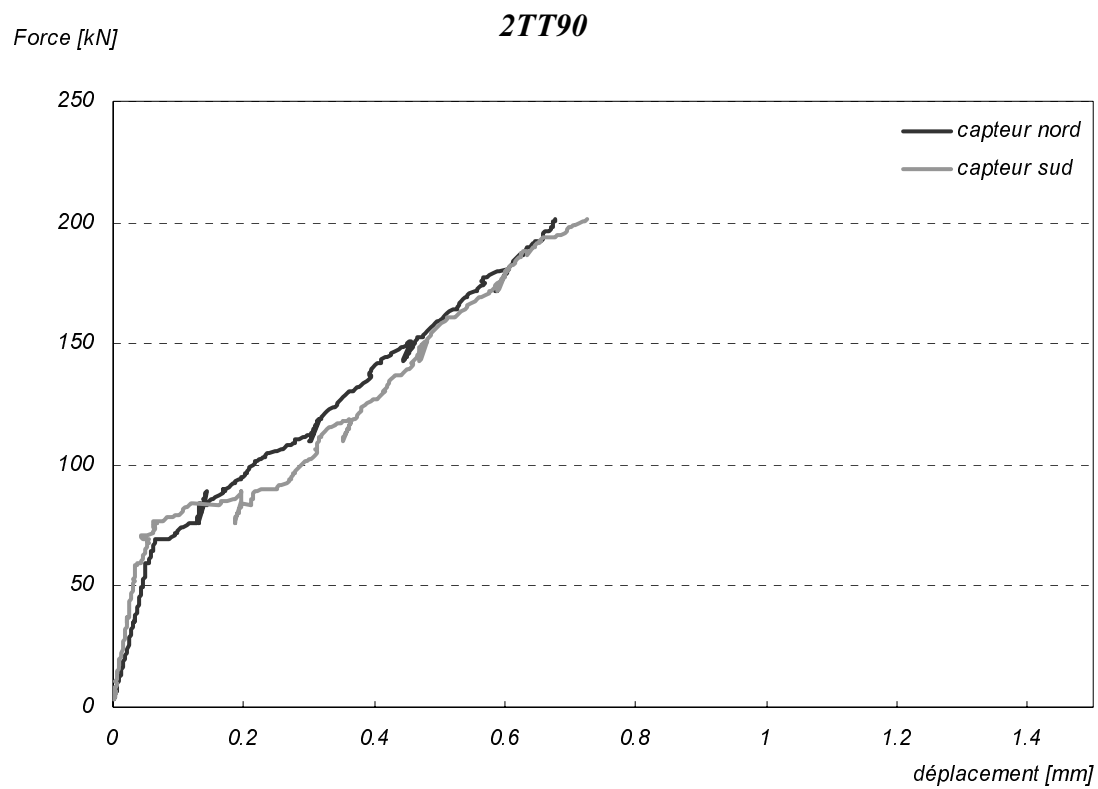


A2.5 Traction sur tirant armé









A2.6 Flexion 4-points

